



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

연료전지-배터리 하이브리드 선박의  
온실가스 배출 저감에 대한 실증 연구

An Empirical Study on Greenhouse Gas Emission Reduction of  
Fuel Cell-Battery Hybrid Ships

지도교수 김 종 수

2019年 8月

한국해양대학교 해사산업대학원

기관시스템공학과

강 경 욱

본 논문을 강정욱의 공학석사 학위논문으로 인증함

위원장 : 김 성 환



위 원 : 오 세 진



위 원 : 김 종 수



2019년 6월 26일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

목 차 .....	i
List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	v
용어설명 .....	viii
 제 1 장 서론 .....	 1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 내용 .....	2
1.3 논문의 구성 .....	3
 제 2 장 선박용 연료전지 .....	 5
2.1 선박용 연료전지 국내외 개발 동향 .....	5
2.2 선박용 연료전지 시스템의 종류와 특성 .....	5
2.3 선박 추진시스템에 적합한 연료전지 선정 .....	10
 제 3 장 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 실 선박 적용 검토 .....	 12
3.1 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 적용 대상 디젤 선박 선정 ...	12
3.2 대상 선박의 항로 분석을 통한 부하 환경 설정 .....	13
3.3 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 구성 .....	14
3.3.1 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 .....	14
3.3.2 연료전지 시스템 .....	15
3.3.3 연료공급 시스템 .....	17
3.3.4 리튬이온 배터리 시스템 .....	20
3.3.5 DC-DC 컨버터의 특성 .....	21
3.3.6 추진 전동기 .....	22

제 4 장 부하 환경에 따른 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 시뮬레이션	24
4.1 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 적용한 시뮬레이션	24
4.1.1 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 부하운전 환경	24
4.1.2 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 시뮬레이션 결과	24
4.2 시뮬레이션 결과 분석	35
제 5 장 디젤엔진 추진 선박의 배기가스 및 연료 소모량 측정	36
5.1 디젤엔진 추진 선박의 배기가스 측정	36
5.1.1 배기가스 측정 장비	36
5.1.2 배기가스 측정 방법	38
5.1.3 디젤엔진 추진 선박 배기가스 측정결과	40
5.1.4 디젤엔진 추진 선박의 운전 특성 결과 분석	44
5.2 디젤엔진 추진 선박의 연료 소모량	46
5.2.1 연료 소모량 측정 장비	46
5.2.2 연료 소모량 측정 방법	46
5.2.3 디젤엔진 추진 선박의 연료 소모량	47
제 6 장 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 선박과 디젤엔진 추진 선박의 배 기가스 배출량 및 연료 소모량 비교	48
6.1 연료전지-배터리 하이브리드 선박 수소 소모량	48
6.2 디젤엔진 추진 선박과 연료전지-배터리 하이브리드 선박의 연료 소모 량 비교분석	49
제 7 장 결론	50
참고문헌	51

## List of Tables

Table 2.1	Project Processing of fuel cell for vessel
Table 2.2	Kind of fuel cell and specification of fuel cell
Table 2.3	Suitable fuel cell types
Table 3.1	Specifications of the Hansol No. 2 passenger vessel
Table 3.2	Fuel cell stack parameters
Table 3.3	Lithium-ion battery parameter
Table 3.3	Parameter of induction motor
Table 5.1	Equipment used for gas measurement
Table 5.2	Comparison of exhaust emission
Table 5.3	Diesel oil consumption
Table 6.1	Comparison of fuel consumption

## List of Figures

- Fig 3.1      Hansol No. 2 photo and navigation route
- Fig 3.2      Analysis of target vessel navigation route for creating load profile
- Fig 3.3      Hansol No. 2 Load profile
- Fig 3.4      Fuel Cell-Battery Hybrid Electric Propulsion System Basic Block Diagram
- Fig 3.5      Basic structure of fuel cell
- Fig 3.6      Fuel cell power converter
- Fig 3.7      Fuel cell stack and control system
- Fig 3.8      Fuel cell fuel supply selection control circuit
- Fig 3.9      Lithium-ion battery basic structure
- Fig 3.10     Lithium-ion battery system configuration
- Fig 3.11     DC-DC converter system configuration
- Fig 3.12     Inverter control circuit for propulsion motor speed control
- Fig 4.1      Fuel cell hybrid system Load profile
- Fig 4.2      Fuel cell system simulation circuit configuration
- Fig 4.3      Propulsion system Simulation circuit configuration
- Fig 4.4      Load profile section 1, 3, 5, 7 fuel cell hybrid system simulation result
- Fig 4.5      Load profile section 4, 8 fuel cell hybrid system simulation result
- Fig 4.6      Load profile section 9 fuel cell hybrid system simulation result
- Fig 4.7      Load profile section 2, 6 fuel cell hybrid system simulation result
- Fig 5.1      Exhaust gas sampling device
- Fig 5.2      Exhaust gas component analyzer
- Fig 5.3      Exhaust gas analyzer area and representative spectrum
- Fig 5.4      Load profile section 1, 3, 5, 7 emission gas measurement data
- Fig 5.5      Load profile section 4, 8 emission gas measurement data
- Fig 5.6      Load profile section 9 emission gas measurement data
- Fig 5.7      Load profile section 2, 6 emission gas measurement data
- Fig 5.8      Measuring fuel consumption by flow meter

# An Empirical Study on Greenhouse Gas Emission Reduction of Fuel Cell-Battery Hybrid Ships

Kyoung Wook, Kang

*Department of Marine Engineering*  
*Graduate School of Korea Maritime and Ocean University*

## Abstract

In this paper The goal of Korea's green house gas reduction target is set at 37% of the emission estimate by 2030. The international Maritime Organization aims to reduce the total annual green house gas emissions of all vessels by more than 50%.

In this paper, in order to demonstrate the advantages of fuel cell-battery hybrid electric propulsion system in reducing greenhouse gas emissions and reducing fuel consumption, a diesel propulsion system was constructed as a test bed, the characteristics of exhaust emission and fuel consumption were compared and analyzed through the load operation environment setting and verification experiment of the ship.

The emission reduction of nitrogen oxides and carbon dioxide, which are regulated by the international Maritime Organization, is measured by measuring the emission gas and fuel consumption of ships using diesel engines, and the hydrogen unit price consumed in the ship using the fuel cell-battery hybrid system and compared the economics of the two propulsion systems.

In addition, a hybrid electric propulsion system using a fuel cell and a



battery was designed to verify the stability of the load power system of the ship.

**KEY WORDS:** PEMFC, Lithium-ion battery, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>

# 연료전지-배터리 하이브리드 선박의 온실가스 배출 저감에 대한 실증 연구

강 경 욱

한국해양대학교 대학원  
기관시스템공학과

## 요 약

우리나라의 온실가스 감축 목표는 2030년까지 배출 전망치 대비 37[%]로 확정했으며, 국제해사기구에서는 전체 선박의 연간 온실가스 총배출량을 2050년까지 2008년 대비 50% 이상 감축을 목표로 하고 있다.

본 논문에서는 연료전지-배터리 하이브리드 전기추진시스템의 온실가스 배출 저감과 연료 소모량 감소 특성의 장점을 입증하기 위해 연료전지-배터리 하이브리드 전기추진시스템과 동일한 출력의 디젤 추진시스템을 테스트 베드로 구축하고 실 해역 운항 선박의 부하 운전환경 설정 및 실증 실험을 통해 배기가스 배출량과 연료 소모량 특성을 비교 분석하였다.

디젤엔진을 사용하는 선박의 발생 배기가스와 연료 소모량을 측정하여 국제해사기구에서 규제하고 있는 질소산화물 및 이산화탄소의 배출 저감효과를 분석하고, 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 이용하는 선박에서 소비되는 수소 소모량 및 가격을 비교하여 두 추진시스템의 경제성을 평가하였다.

또한, 선박의 부하전력 계통의 안정성을 확인하기 위해 연료전지와 배터리를 사용하는 하이브리드 전기추진시스템을 설계하였으며 시뮬레이션을 통해 실 선박 적용에 대한 유용성을 평가하였다.

**KEY WORDS:** 고분자 전해질 연료전지, 리튬이온 배터리, 질소산화물, 황산화물

## 용어설명

PEMFC	고분자 전해질 연료전지(Polymer exchange membrane fuel cell)
Lithium-ion battery	이차전지의 일종으로서, 방전 과정에서 리튬이온이 음극에서 양극으로 이동하는 전지
Fuel cell-battery hybrid propulsion system	연료전지를 주 추진으로 하고 급격한 부하 변화에 배터리를 이용하는 선박의 추진시스템
Green house gas	지구의 지표면에서 우주로 발산하는 적외선 복사열을 흡수 또는 반사하여 지구 표면의 온도를 상승시키는 가스
NO <sub>x</sub>	질산 증기 및 관련된 입자 형상의 화합물
SO <sub>x</sub>	황산 증기 및 관련된 입자 형상의 화합물

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

국제해사기구에서는 선박에 대한 전 세계적인 온실가스 감축을 위한 규제 방안을 수립하였으며, 국제해운 운송 분야에서 선박의 한 항차당 평균 이산화탄소 배출량을 2030년까지 2008년 대비 최소 40[%]를 감축하고 2050년까지 70[%] 개선을 목표로 하고 있다. 우리나라 환경부에서도 온실가스 국가 배출권 할당 계획을 세워 ‘2030 온실가스 감축 로드맵’을 실현하기 위해 기관별 온실가스 배출권 할당 등에 대한 종합적 기준을 마련하였다.

이러한 각종 환경규제에 대비하여 친환경 선박기술의 개발에 대한 필요성이 부각 되고 있으며 선박의 효율 개선 및 CO2 저감기술 개발은 중요한 사회적 이슈가 되고 있다.

연료전지-배터리 하이브리드 동력원을 사용하는 친환경·고효율 선박의 경우 발전효율이 47~60[%]에 이르고 친환경 에너지 생산 시스템으로 황산화물 및 질소산화물의 발생이 없으며, 이산화탄소 배출은 가스터빈 대비 50[%] 이상 저감된다. 또한, 연료전지-배터리 하이브리드 동력원은 평균 전력이 피크 전력보다 작은 연료전지와 피크 전력을 부담할 수 있는 배터리를 사용하여 하이브리드 시스템을 구성하는 경우에 연료전지만 단독으로 사용하는 시스템에 비해 추진 전력에 대해 연료전지의 크기를 작게 설계할 수 있는 특성을 가진다.

본 연구에서는 디젤엔진을 추진기로 사용하는 대상 선박과 동일한 출력의 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 적용하는 선박의 환경적, 경제적인 특성을 비교하였다. 디젤엔진을 사용하는 대상 선박의 실 해역 운전 부하 환경을 실측을 통해 설정하고 테스트 베드에 설치된 디젤엔진을 운전하여 발생하는 질소산화물 및 이산화탄소 배출량과 연료 소모량을 실제로 측정하여 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 구축 선박의 경우와 비교 분석하여 상호 우수성을 입증하였다. 또한, 선박의 부하전력 계통의 안정성을 확인하기 위해 연료전지와 배터리

를 사용하는 하이브리드 전기추진시스템을 설계하고, 두 시스템의 배기가스 배출 및 연료 소모량 특성 비교분석을 위해 테스트 베드를 구축하였으며 시뮬레이션을 통해 실 선박 적용 가능 여부를 확인하였다.

## 1.2 연구내용

본 연구에서는 디젤엔진을 주 동력원으로 사용하는 선박의 배기가스 저감 및 연료 소모량의 감소를 목적으로 연료전지-배터리의 하이브리드 추진시스템의 유효성과 실 선박 적용성을 평가 분석하고자 하였다. 이를 위해 디젤엔진을 대체할 연료전지의 개발 동향 및 선박에 적합한 타입의 선정, 실 선박 적용을 위한 부하 운전환경분석, 하이브리드 시스템의 시뮬레이션 및 디젤 선박과 연료전지-배터리 하이브리드 선박의 비교분석을 수행하였다.

먼저 연료전지는 구조가 단순하며 선박에 적용이 용이한 저온형 고분자 전해질 연료전지(PEMFC: Polymer Exchange Membrane Fuel Cell)를 선정하고 연료전지의 출력이 추진 전동기의 부하를 순간적으로 추종할 수 없거나 선박의 전체 필요 부하량에 비해 낮은 경우에 선박 전력 시스템을 안정화할 수 있도록 리튬이온 배터리를 보조 동력원으로 설계하여 MATLAB/Simulink와 PSIM 소프트웨어를 사용하여 하이브리드 전기추진시스템의 운항 부하 환경에 따라 시뮬레이션을 수행하여 실선 적용성을 분석하였다.

연료전지의 출력은 150[kW]로 선정하였으며 350[kW]급 리튬이온 배터리를 보조 동력원으로 설계하였다. 또한, 전력변환장치는 연료전지의 출력을 DC-link 단의 기준전압에 일치하도록 변환시키는 단방향 하프 브리지 DC/DC 컨버터와 배터리의 충, 방전을 위한 양방향 DC/DC 컨버터 및 추진 전동기의 구동을 위해 인버터로 구성하였다.

연료전지-배터리 하이브리드 전기추진시스템과 동일한 출력의 디젤 기관의 실측을 통해 분석한 부하운전 환경을 이용하여 구축된 테스트 베드에서 실험한 배기가스 및 연료 소모량을 연료전지-배터리 하이브리드 전기추진시스템의 성

능과 비교하였으며 국제해사기구에서 규제하고 있는 질소산화물 및 이산화탄소 배출 저감효과를 평가하였다.

### 1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다.

1장 서론에서는 연구배경과 내용 및 논문의 구성에 관하여 간단히 기술하고,

2장에서는 선박용 연료전지의 국내외 개발 동향 및 종류와 특성에 관하여 설명하였다.

3장에서는 연료전지-배터리 하이브리드 시스템의 실 선박 적용 검토를 위한 대상 디젤 선박을 선정하였으며, 대상 선박의 항로 분석을 통한 부하 운전환경을 설정하고 연료전지-배터리 하이브리드 시스템의 각 구성요소에 관하여 설명하였다.

4장에서는 제안하는 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 동일한 출력의 디젤엔진을 동력원으로 사용하고 있는 선박의 부하운전 환경을 적용하여 시뮬레이션하여 실 선박 추진시스템으로서의 적용 가능성을 분석하였다.

5장에서는 대상 디젤엔진 선박의 부하운전 환경을 활용하여 테스트 베드에서 부하운전 환경에 따라 발생하는 디젤엔진의 질소산화물 및 이산화탄소 발생량을 측정하였으며, 측정된 수치를 항차별 발생량 및 하루 발생량으로 산정하였으며 디젤 기관의 연료 소모량은 실측하였다.

6장에서는 디젤엔진을 주 동력원으로 사용하는 선박에서의 실측 배기가스 및 연료 소비량을 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 이용하는 선박에서의 값과 비교하여 환경적, 경제적 유용성을 분석하였다.

7장에서는 연료전지-배터리 하이브리드 추진시스템의 연구결과 분석 및 향후 연구과제의 방향에 관하여 언급하였다.

## 제 2 장 선박용 연료전지

### 2.1 선박용 연료전지 국내외 개발 동향

선박용 연료전지를 설치한 선박은 90년대 중반 연료전지 적용성 검토와 타당성 평가 이후에 유럽연합을 중심으로 개발 로드맵을 확정하는 등 연구개발이 활성화되고 있다.

유럽연합에서는 2010년 ‘100[kW]급 PEMFC(50[kW]급 2기)의 실증선 운항’ 과제를 성공적으로 완료해 선박의 주 동력용 연료전지를 개발하였다. 또한, 2016년에 10개월 동안 진행된 ‘e4Ship - 350[kW] ~ 500[kW]급 MCFC’의 해상 실증을 통해 연료전지 선박을 검증하였으며 노르웨이에서는 320[kW]급 MCFC를 사용하여 ‘320[kW]급 MCFC 시스템 100시간 해상 실증’ 연구를 종료하는 등 유럽을 중심으로 선박용 연료전지의 적용이 활성화되고 있다.

국내에서는 2015년 ‘50[kW]급 50인승 연료전지 선박 Gold green HYGEN 호’로 개발을 시작하였으며 현재 한국선급 주관으로 ‘미세먼지 무배출 선박용 PEMFC 하이브리드 시스템 개발 및 실증’ 과제를 진행하는 등 연료전지에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. Table 2.1은 지금까지 진행된 연료전지 관련 연구과제를 나타낸다.

### 2.2 선박용 연료전지 시스템의 종류와 특성

선박용 연료전지는 일반적으로 전해질의 특성에 따라 구분되며 그 기본적인 특징은 다음 Table 2.2와 같다.



**Table 2.1** Project Processing of fuel cell for vessel

Nationality	JAPAN	NORWAY	EU			AMERICA
PROJECT	NYK Super Eco Ship	Green Ship of the Future (FellowShip)	e4Ship	ZEMShip	Methapu	SSFC
GOAL	Fuel cell hybrid vessel development	Development of fuel cell for ship auxiliary power	Fuel cell vessel commissioning	Development of fuel cell for ship main power	Development of fuel cell for ship auxiliary power	Development of fuel cell for ship auxiliary power
Fuel cell type	400[W] Fuel cell (LNG gas used)	320[W], MW MCFC (LNG gas used)	350[kW]~500[kW] MCFC	100[kW] PEMFC (50[kW] 2 unit)	20[kW] SOFC	2.5[MW] MCFC(Liquid fuel : JP-5, NATO-F76)
Business expense	More than 100 billion won	About 20 billion won(Steps 1 and 2)	About 85 billion won	About 100 billion won	About 30 billion won	-
Business term	2009~2030	2003~2010 (1, 2step) 2010 ~(3step)	2009~2016	2006~2010	2006~2010	2003~2009
Result	Research and development	320[kW]class MCFC system 10 hours of marine demonstration completed MWclass MCFC system development (3 step)	Completed 10 months of marine demonstration(Sc hIBZ Project)	2009~2010 Operation vessel	20[kW] SOFC 1000hours demonstration completed	300[kW]class MCFC 1000hours liquid fuel evaluation(Athletics)

**Table 2.2** Kind of fuel cell and specification of fuel cell

	PEMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Polymer Membrane	Liquid H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Liquid KOH	Molten Carbonate	Ceramic
Catalyst	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Operating temperature	80[°C]	200[°C]	60[°C]~220[°C]	650[°C]	600[°C]~1000[°C]
Cell configuration	Carbon based	Carbon based	Carbon based	Stainless based	Ceramic based
Main fuel	Hydrogen Methanol	Natural gas Methanol	Hydrogen	Natural gas LPG Coal gas	Natural gas Coal gas
Usage	For transportation Distributed type Portable generator Transportation (Passenger cars, buses, ships, etc.)	Local installation / Distributed type Cogeneration Small power plant For transportation Hospital, Hotel, bus MW or less	A special purpose(Ship power, submarine)	Distributed type Cogeneration Large power plant MW	Distributed type Cogeneration Large power plant MW

## 1) 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuelcell)

고분자 전해질 연료전지의 전해질은 액체가 아닌 고체 고분자 중합체로서 다른 연료전지와 구별되며 인산형 및 알칼리형 연료전지 시스템과 비슷하게 촉매로 백금을 사용한다. 고분자 전해질 연료전지의 개발 목표는 최소 1.5[g/kW]의 백금 촉매를 쓰는 것이며 이 백금 촉매는 일산화탄소에 의한 부식에 민감하므로 일산화탄소의 농도는 1000[ppm] 이하로 유지하여야만 한다.

고분자 전해질 연료전지는 인산형에 비해 저온에서 동작되며 출력 밀도가 크므로 소형화가 가능하고 제작기술이 인산형과 유사하여 응용 기술 적용이 쉬우므로 현재는 고분자 전해질 연료전지가 많은 분야에서 적용되고 있다. 또한, 저렴한 재료를 사용할 수 있으므로 저 비용화도 기대되고 있으며 자동차뿐만 아니라 선박용으로도 적용이 가능하다.

## 2) 인산형 연료전지 (PAFC: Phosphoric Acid Fuelcell)

인산형 연료전지 기술은 초기 개발 이후 20년 이상 개선되어왔으며 전력 생산에 70[%] 이상의 순도를 가진 비교적 순수한 수소를 필요로 한다. 인산형 연료전지의 전극은 탄소 지지체의 표면적 위에 촉매로써 백금이나 백금 혼합물을 포함한다.

인산형 연료전지의 운전 온도는 약 200[°C]이며 이것은 인산 전해질의 안정도를 위하여 허용하는 최대값을 나타내고 이 기술로 현재까지 순수한 발전효율은 40[%] ~ 50[%] 정도이다. 이 수준보다 높은 효율을 갖기 위해서는 전지와 스택 구성품의 지속적인 개발에 의한 종합시스템 제어에 의존하여야 한다. 일례로 인산형 연료전지의 반응이 발열 반응이므로 연료전지가 반응온도인 200[°C]로 유지되면 최적의 운전 조건이 되고, 따라서 연료전지 반응 시 반응열을 냉각시켜야 하며 이때 생성되는 반응열을 이용하면 효율을 70[%] 이상 높일 수 있다.

### 3) 알칼리 연료전지 (AFC: Alkaline Fuelcell)

알칼리 연료전지는 전해질로써 수산화칼륨과 동일한 알칼리를 사용하며, 연료는 수소를 사용하고, 산화제로 순수한 산소를 쓴다. 연료전지의 운전 온도는 대기압에서 60[°C] ~ 120[°C]이며, 애노드측의 촉매는 니켈에 은을 입히고 그 상부에 백금-납을 사용하고, 캐소드는 니켈에 금을 입히고 위에 금-백금을 사용한다. 알칼리 연료전지의 고효율화의 기본적인 목적은 자동차 산업의 전원 공급용이다.

### 4) 용융 탄산염 연료전지 (MCFC: Molten Carbonate Fuelcell)

용융 탄산염 연료전지의 전해질은 낮은 용융점을 가지는 탄화리튬과 탄화포타슘의 혼합물이며, 전극은 다공성 니켈로 제작하고 전극의 부식성과 내구성은 아직 개발에 중요한 단점으로 작용한다.

용융 탄산염 연료전지 기술의 장점은 일산화탄소, 이산화탄소 및 수소에 대하여 내성이 높다는 점이며, 이것은 일산화탄소와 이산화탄소를 분리하는 공정을 필요로하는 다른 연료전지보다 초기 투자비가 낮고 시스템 설계가 매우 단순해지는 결과를 가져온다. 용융 탄산염 연료전지의 운전 온도는 약 650[°C]이고, 전지 스택의 열로 전지 내부의 탄화수소 기체의 개질을 허용하며, 내부 개질의 장점은 30[%] 또는 그 이상의 비용을 감소시킨다.

용융 탄산염 연료전지의 상업화를 위해서는 현재보다 내구성과 신뢰도를 개량시킬 필요가 있으며, 그 이유는 운전 온도가 높아 정상운전 되는 동안 용융 탄산염 전해질의 결핍과 증발로 인하여 양이 줄어들기 때문이다.

### 5) 고체 산화물 연료전지 (SOFC : Solid Oxide Fuelcell)

고체 산화물 연료전지는 연료극, 공기극, 전해질의 산화물 세라믹으로 구성되며, 연료인 메탄은 연료 극상에서 수증기와 반응하여 수소와 이산화탄소로 개질된다. 고체 산화물 연료전지의 작동온도가 700[°C] ~ 1000[°C]로 고온이고 연

료 극의 성분인 니켈 촉매작용에 의해 전지 내에서 수증기 개질 (내부 개질)을 수행하는 것이 가능하다. 개질 반응에 의해 생성된 수소 혹은 일산화탄소와 전기 화학적 반응하여 물 혹은 이산화탄소를 생성한다. 이때 방출된 전자에 의해 발전한다. 이와같이 해서 연료가 갖고 있는 화학 에너지를 직접 전기 에너지로 변환하기 때문에 에너지 변환 손실이 적고 고효율 발전이 가능하다.

고체 산화물 연료전지의 가장 독특한 특성은 운전 온도는 약 1000[°C]로써 매우 높다는 것이다. 이 온도에서는 수소와 일산화탄소의 전기 화학적 산화 반응이 일어나고 촉매 없이 연료가 개질된다. 운전 온도 1000[°C]에서 금속 재료의 적당한 열적-기계적 강도를 요구하기 때문에 가스 누출 방지가 가장 중요한 애로 사항이다. 세라믹 재료 기술의 개발은 고체 산화물 연료전지가 상업적으로 발전을 시작하기 전에 필요한 기술이다.

## 2.3 선박 추진시스템에 적합한 연료전지 선정

연료전지는 운전 온도에 따라 고온형과 저온형으로 나뉘며 이중 인산형 연료전지와 고분자 전해질 연료전지 시스템이 소형 경량화가 가능하고 비교적 운전 온도가 낮아 자동차 및 선박의 전력원으로 적합하다.

DNVGL에서 발행한 ‘Maritime Fuel Cell Applications 21 February 2018’ 에서는 Table 2.3과 같이 고분자 전해질 연료전지의 높은 개발 성능과 동적 부하 운전 환경에 적용 가능함을 근거로 선박의 동력원으로 사용하기에 가장 적당함을 소개하였다.

본 연구에서는 기본적으로 구조가 단순하며, 선박에 적용이 용이하다고 알려진 저온형 고분자 전해질 연료전지를 선박의 동력원으로 선정하고 리튬이온 배터리와 연계하여 하이브리드 시스템을 구성하였다.

고분자 전해질 연료전지의 경우에 출력 밀도가 높으므로 소형 및 경량화가 가능하고 저렴한 재료를 사용할 수 있어서 초기 설치 비용이 감소하는 특성을 가지고 있다.

**Table 2.3** Suitable Fuel Cell Types

Fuel cell type	Temperature(°C)	Electric efficiency(%)
Proton Exchange Membrane (PEM)	30 - 100	> 50
High Temperature PEM(HT-PEM)	160 - 200	~ 45
Molten Carbonate (MCFC)	~650	> 50
Solid Oxide (SOFC)	500 - 1100	> 50

## 제 3 장 연료전지-배터리 하이브리드 시스템의 실 선박 적용 검토

### 3.1 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 적용 대상의 디젤 선박 선정

연료전지와 배터리 하이브리드 시스템의 출력을 고려하여 Fig 3.1과 같이 통영항에서 소매물도까지 운항하는 “한솔 2호”를 대상 선박으로 선정하였으며, Table 3.1에 선박의 제원을 명시하였고 선박의 운항 특성을 분석하여 부하운전 환경을 분석하고 이를 이용하여 대상 디젤 선박의 엔진 부하별 배기가스 성분을 실측하여 질량으로 환산하였다.



Fig 3.1 Hansol No. 2 photo and navigation route

Table 3.1 Specifications of the Hansol No. 2 passenger vessel

Content	Parameter
Capacity	230 passengers
Length	33.80[m]
Breadth	6.00[m]
Depth	2.40[m]
Draft	1.90[m]
Displacement	109[ton]
Top speed	13[Kn]
Powering at Top speed	500[kW] × 2EA

### 3.2 대상 선박의 항로 분석을 통한 부하 환경 설정

대상 선박인 “한솔 2호”의 운항 항로인 통영항에서 소매물도까지의 편도 구간을 Fig 3.2와 같이 9단계로 나누어 Fig 3.3과 같이 실제 부하운전 환경을 도출하였다.



Fig 3.2 Analysis of target vessel navigation route for creating load profile

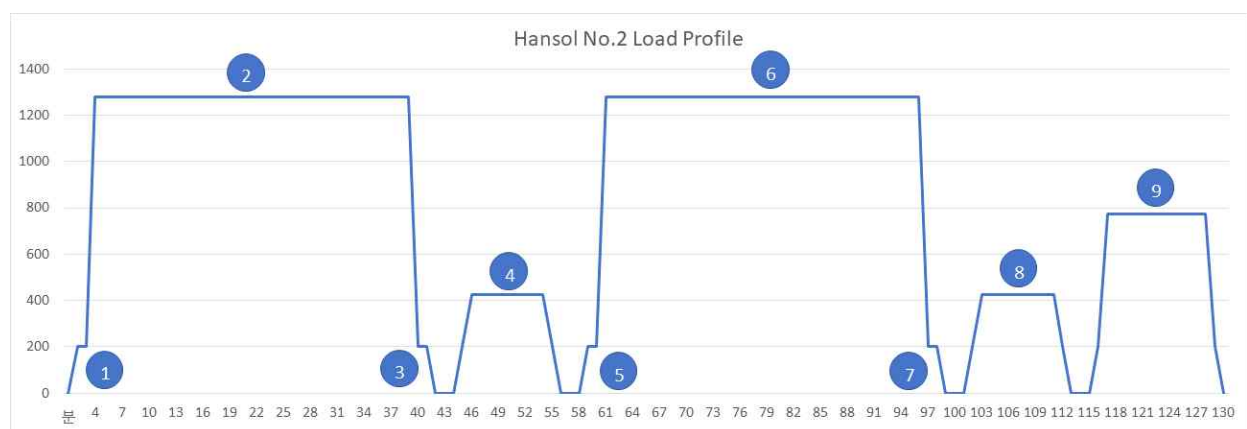


Fig 3.3 Hansol No. 2 Load profile



### 3.3 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 구성

#### 3.3.1 연료전지-배터리 하이브리드 시스템

연료전지 배터리 하이브리드 전기추진시스템은 Fig 3.4와 같이 연료전지, 리튬이온 배터리, 전력변환장치 및 추진 전동기로 구성된다. 연료전지는 150[kW] 출력의 저온형 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)를 적용하였으며, 배터리는 350[kW] 리튬이온 배터리를 사용하였다. 전력변환장치는 연료전지의 출력을 DC-link단의 기준전압에 일치하는 직류로 변환시키는 단방향 하프 브리지 DC/DC 컨버터와 배터리의 충, 방전을 위한 양방향 DC/DC 컨버터 및 500[kW] 추진 교류전동기의 속도제어를 위해 DC link단의 직류를 교류로 변환하는 인버터로 구성하였다.

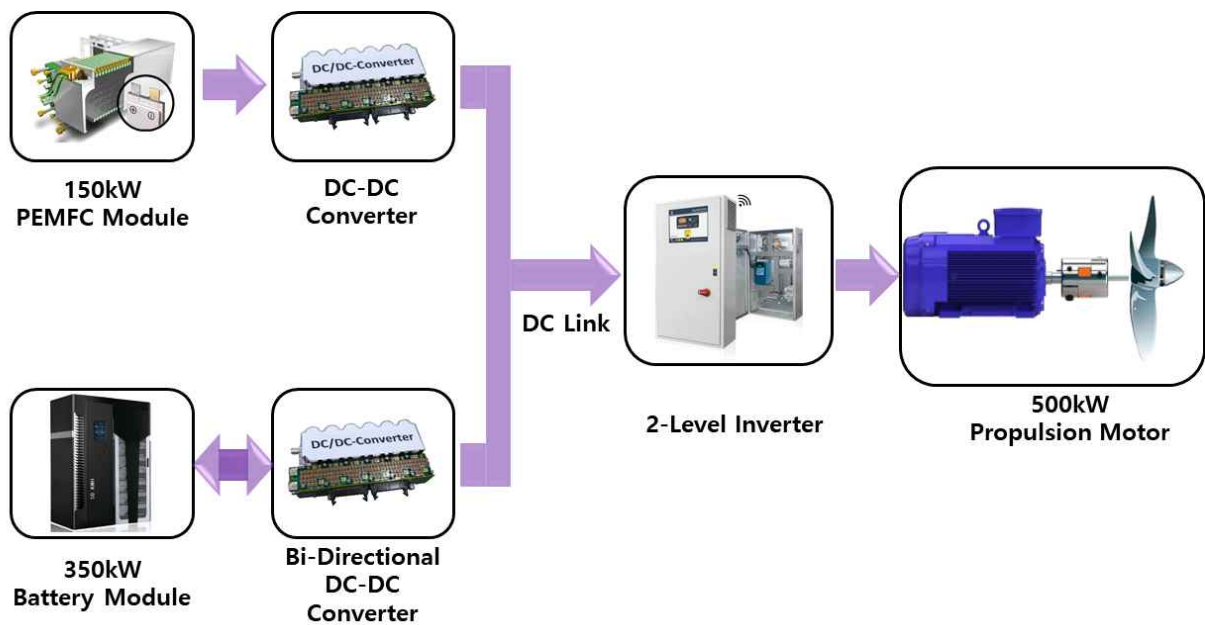
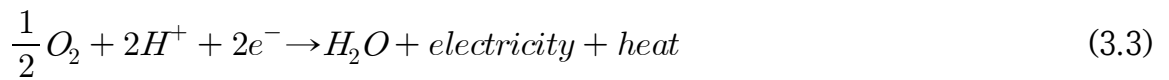


Fig 3.4 Fuel Cell-Battery Hybrid Electric Propulsion System Basic Block Diagram

### 3.3.2 연료전지 시스템

하이브리드 전기추진시스템의 동력원인 연료전지의 화학적 특성은 식 (3.1) ~ (3.3)과 같이 나타낼 수 있다.



PEMFC의 전해질은 고체 고분자로서 Fig 3.5와 동일한 구조를 가지고 있어 수소 이온이 통과할 수 있고 수소 이온과 산소 및 전자가 화학 반응을 통해 발전을 하고 부산물로 물과 열을 발생시킨다.

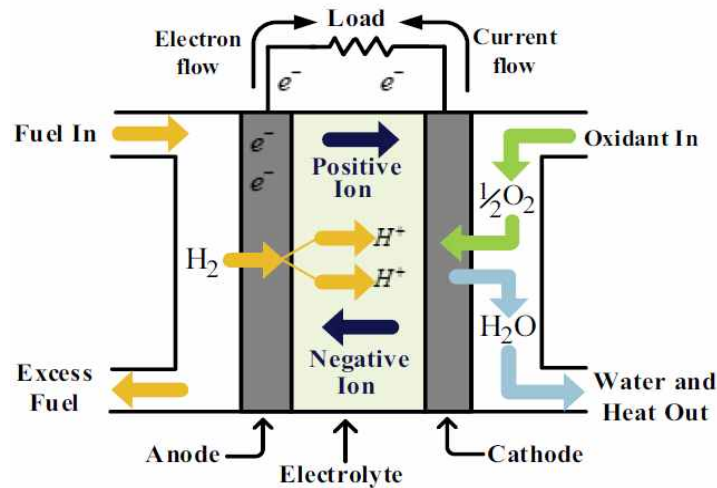


Fig 3.5 Basic structure of fuel cell

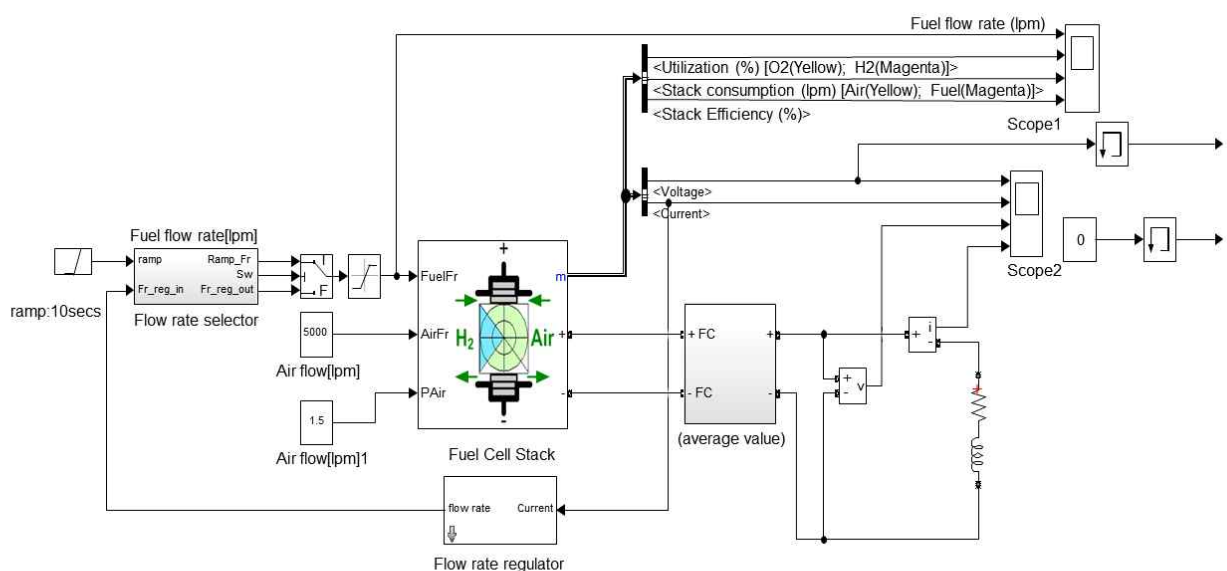
전해질이 고체이면서 움직이지 않기 때문에 구조가 본질적으로 단순하며, 여러 가지 수소공급 방법을 적용할 수 있지만 극히 순수한 수소가 사용되는 것이 연료전지의 성능을 출력하는데 가장 좋으므로 MATLAB/Simulink를 이용하여 순수한 수소를 연료로 하는 연료전지 시스템을 구성하였다.

연료전지 스택은 Table 3.2와 동일한 파라미터로 설계하였으며 출력 전압이 전류가 증가함에 따라 활성화 손실, 저항 손실 및 농도 손실 등에 의해 전압 강하가 발생하는 것을 고려하였다.

**Table 3.2** Fuel cell stack parameters

Content	Parameter
Number of cell	470
Initial temperature of Stack	320[K]
VOC[Open Circuit Voltage]	614[V]
Air flow rate	2,500[l/m]
Normal stack efficiency	55[%]
Coefficient of heat transfer	4,000[W/K]
Stack operation temperature set point	345[K]

연료전지에서 발전되는 전력은 직류이며, 교류 전동기를 추진기로 사용하는 선박 시스템의 경우에는 직류를 교류로 변환하며 속도 및 토크 제어 기능을 담당하는 인버터를 사용한다. 연료전지를 이용하는 전력 변환장치의 구성은 Fig 3.6과 같다.



**Fig 3.6** Fuel cell power converter



$$O_2 Usage = \frac{I_n}{4F} [mol/s] \quad (3.6)$$

전력 향으로 수식을 표현하면 셀의 수를 알 필요 없이 유용하게 사용할 수 있으므로 만약 스택의 각 셀 전압을  $V_c$ 라 하면 전력은 식 3.7과 같이 나타낸다.

$$P_e = V_c \times I \times n \quad (3.7)$$

이를 전류에 대해 정리하면 식 3.8과 같다.

$$I = \frac{P_e}{V_c \times n} \quad (3.8)$$

식 3.8을 식 3.6에 대입하면 식 3.9를 얻을 수 있다.

$$O_2 Usage = \frac{P_e}{4 \times V_c \times F} [mol/s] \quad (3.9)$$

단위를  $[kg/s]$ 로 변경하면 식 3.10을 구할 수 있다.

$$O_2 Usage = \frac{32 \times 10^{-3} \times P_e}{4 \times V_c \times F} = 8.29 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} [kg/s] \quad (3.10)$$

수소의 사용량은 산소와 유사한 방법으로 구할 수 있지만, 수소 1[mol]당 2개의 전자가 생기는 것이 다르므로 연료전지의 수소 사용량 설계치는 식 3.11 및 식 3.12와 같다.

$$H_2 Usage = \frac{I_n}{2F} [mol/s] \quad (3.11)$$

$$H_2 Usage = \frac{P_e}{2 \times V_c \times F} [mol/s] \quad (3.12)$$

여기서, 수소의 분자량은  $2.02 \times 10^{-3} [kg/mol]$  이므로 식 3.13을 얻을 수 있다.

$$H_2 Usage = \frac{2.02 \times 10^{-3} \times P_e}{2 \times V_c \times F} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} [kg/s] \quad (3.13)$$

초기기동에는 연료전지 스택에 공급되는 수소량을 연료 유량 조절기에서 일정한 값으로 공급해주고, 일정 시간이 지난 후 연료 유량 조절기는 바이패스시켜 연료 공급량이 스택 전압의 변화를 따라가기 위해 최대 lpm (liter per min.)으로 증가시키게 되며 Fig 3.8은 연료전지 스택에 공급되는 연료량을 결정하는 유량 선택기를 구현한 제어회로를 나타낸다.

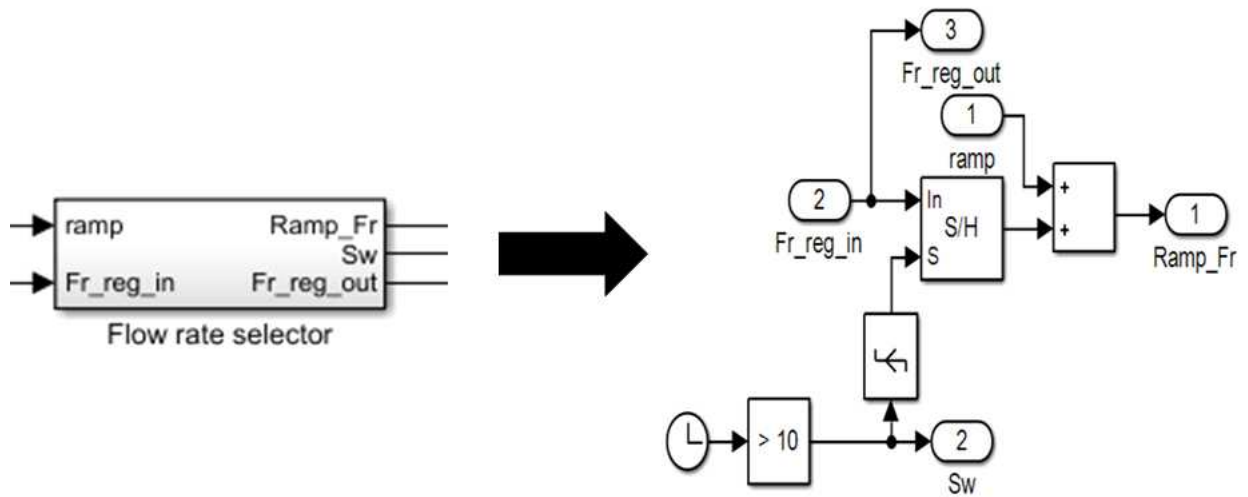


Fig 3.8 Fuel cell fuel supply selection control circuit

### 3.3.4 리튬이온 배터리 시스템

연료전지와 더불어 동력원으로 사용되는 리튬이온 배터리는 가장 큰 비-에너지를 제공하며, 애노드에 리튬 금속이 사용된 재충전 배터리는 매우 높은 에너지 밀도를 제공하고 메모리 효과가 없기 때문에 출력을 유지하기 위해 고의적으로 완전 방전을 할 필요성이 없는 장점이 있다. Fig 3.9는 리튬이온 배터리의 기본적 구조를 나타낸다.

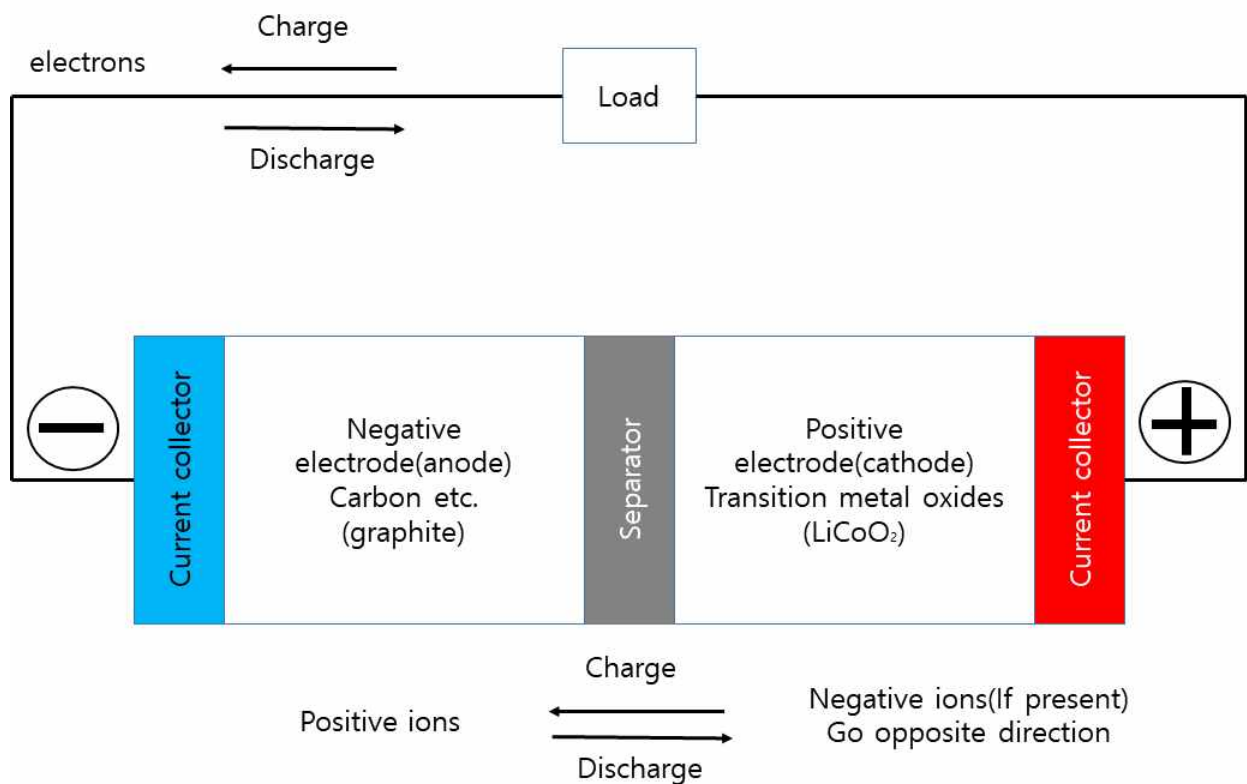


Fig 3.9 Lithium-ion battery basic structure

본 논문에서는 하이브리드 전기추진시스템에서는 연료전지와 함께 리튬이온 배터리를 동력원으로 선정하였으며, 선정한 리튬이온 배터리의 시스템 구성은 Fig 3.10과 같고, 배터리는 ‘SAFT’ 社의 VL-34570으로서 상세한 파라미터는 Table 3.2와 같다.

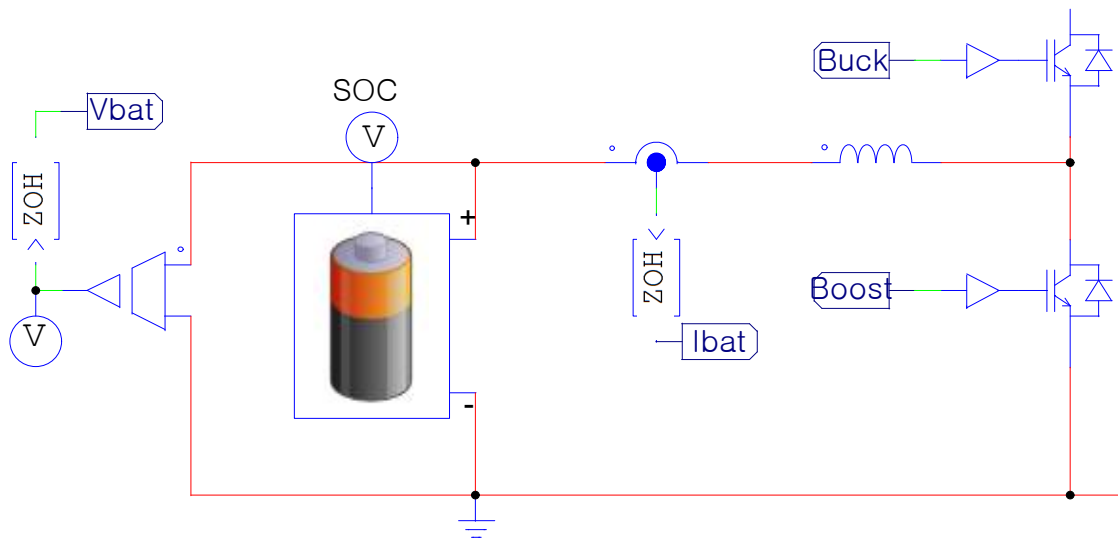


Fig 3.10 Lithium-ion battery system configuration

Table 3.3 Lithium-ion battery parameter

Content	Parameter
Number of cells[Series]	104
Nominal voltage	3.7[V]
Capacity[Typical]	5.4[Ah]
Maximum charge current	4.2[A]
Maximum recommended charge current	5.4[A]
Charge temperature range	-20[°C] ~ 60[°C]

### 3.3.5 DC-DC 컨버터의 특성

연료전지와 배터리의 출력을 직접 이용하기에는 전압의 크기가 일정하지 않으며, 연료전지의 출력 전압은 전류가 커짐에 따라 감소하기 때문에 연료전지의 전압을 더욱 높거나 낮은 일정한 전압으로 변환하고 제어하기 위해 연료전지와 배터리의 출력단에 DC-DC 컨버터를 이용한다.

연료전지의 출력에는 방전을 위한 단방향 하프브리지 DC-DC 컨버터를 사용하였으며, 리튬이온 배터리의 출력에는 충, 방전을 위해 하프브리지 방식을 적용한 양방향 DC-DC 컨버터를 배치하고, 배터리를 충전할 경우에는 DC link 단



의 전압과 일치시키기 위해 승압하도록 제어 로직을 구성하였다.

Fig 3.11은 전력분석 전용 프로그램인 PSIM을 사용하여 구성한 DC-DC 컨버터 시스템을 나타낸 것이다.

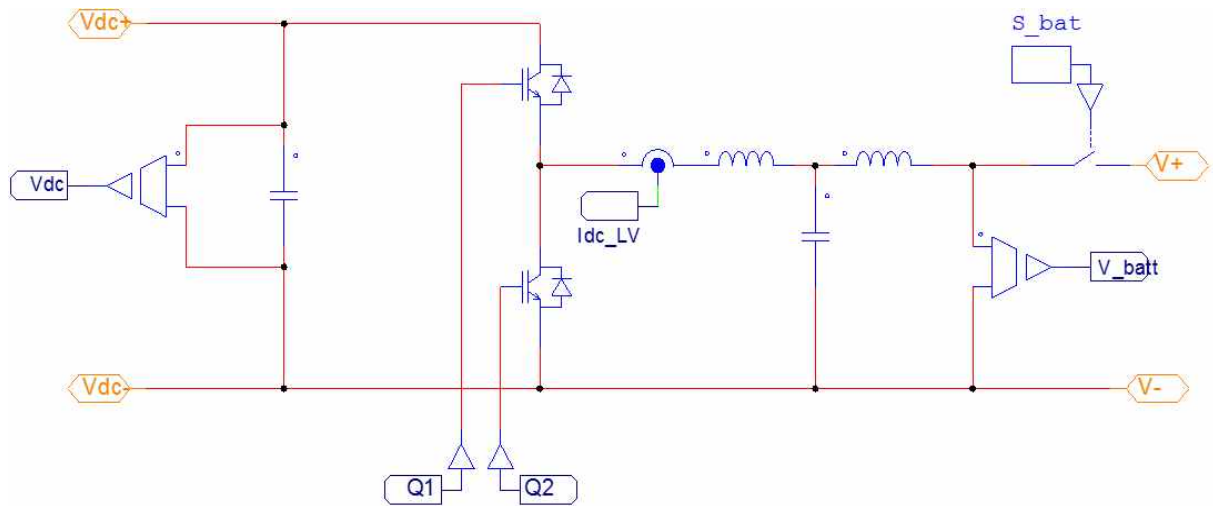


Fig 3.11 DC-DC converter system configuration

### 3.3.6 추진 전동기

추진 전동기로 사용된 유도전동기는 500[kW] 이며, 시뮬레이션에 적용된 유도전동기의 파라미터값은 Table 3.3과 같다.

Table. 3.4 Parameter of induction motor

Content	Parameter
Stator winding resistance	0.0045[ $\Omega$ ]
Stator winding leakage inductance	0.0957[H]
Rotor winding resistance refer to the stator side	0.00075[ $\Omega$ ]
Rotor winding leakage inductance refer to the stator side	0.1486[H]
Magnetizing inductance	2.75[H]
Number of poles	6

추진 전동기의 속도제어를 위해 Fig 3.12와 같이 인버터 제어회로를 구성하였으며 제어 알고리즘은 벡터 제어기법을 사용하였고, 이는 고정자 전류를 토크와 자속 성분으로 나누어 독립적으로 제어할 수 있으므로 직류기의 토크 제어 특성을 얻을 수 있다.

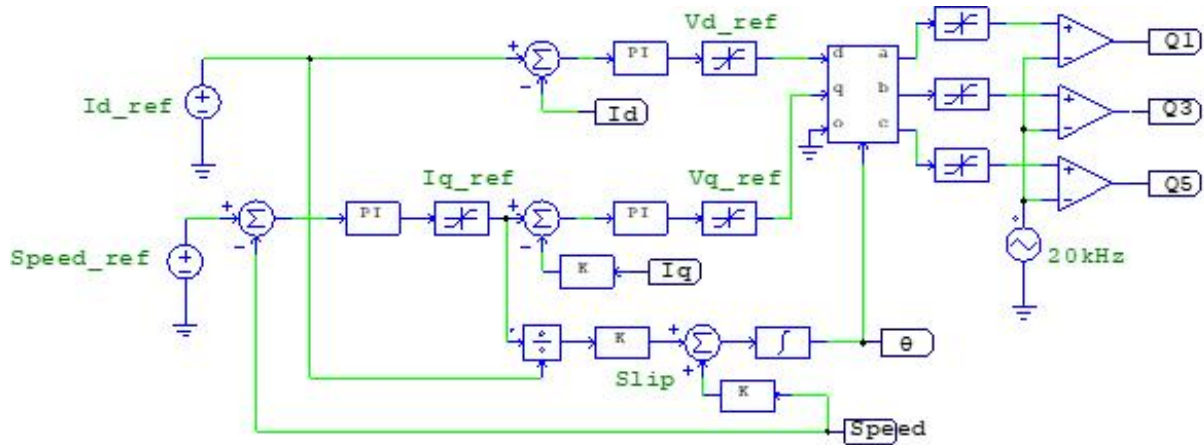


Fig 3.12 Inverter control circuit for propulsion motor speed control

전동기의 고정자에 공급되는 3상의 a, b, c 전류 성분을 dq축의 2상 성분으로 변환하여 단순화하며 d축을 자속 성분으로 설정하고, q축을 토크 성분으로 하여 유도전동기의 속도 및 토크를 제어하며 하였고 전력용 반도체소자의 스위칭을 위해 SPWM 기법을 적용하였다.

## 제 4 장 부하 환경에 따른 연료전지-배터리 하이브리드 시스템의 시뮬레이션

### 4.1 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 적용한 시뮬레이션

#### 4.1.1 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 부하운전 환경

연료전지-배터리 하이브리드 시스템의 운전 실증을 위해서 대상 디젤 선박의 부하운전 환경을 실측하여 Fig. 4.1과 같이 작성하였다.

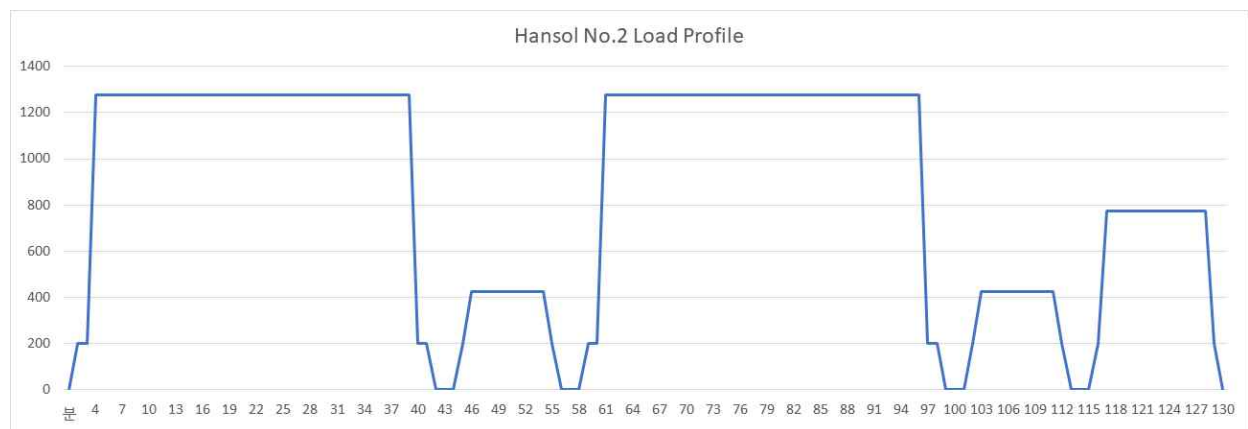


Fig. 4.1 Fuel cell hybrid system Load profile

#### 4.1.2 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 시뮬레이션 결과

하이브리드 전기추진시스템의 동력원인 연료전지는 MATLAB/Simulink를 이용하여 Fig 4.2와 같이 연료전지 스택과 연료 및 공기 공급 제어시스템을 설계하였으며 PSIM과의 연계를 위해 ‘Simcoupler’ Tool을 사용하였다. PSIM을 이용하여 추진시스템을 Fig 4.3과 같이 배터리, 전력변환장치 및 추진 전동기로 구성하였다.

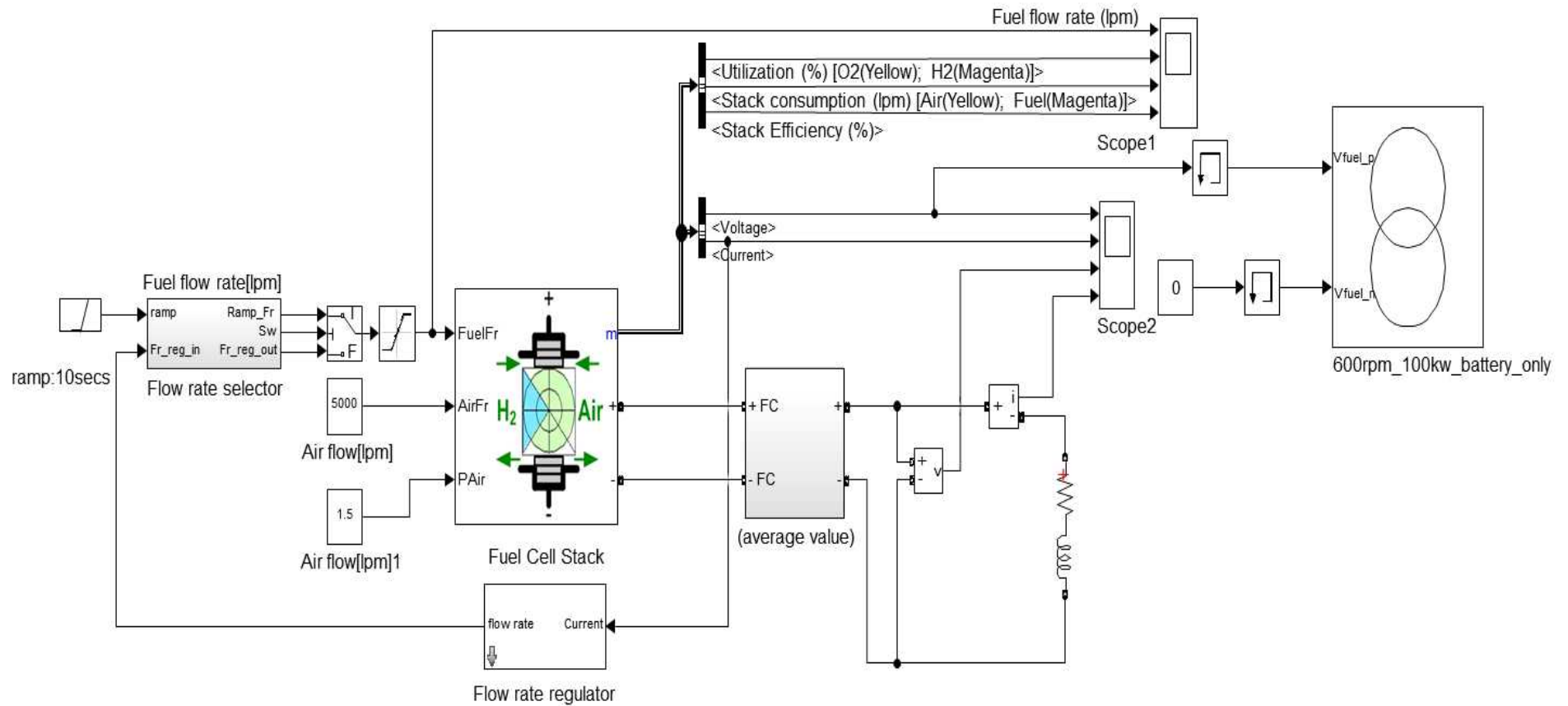


Fig. 4.2 Fuel cell system simulation circuit configuration

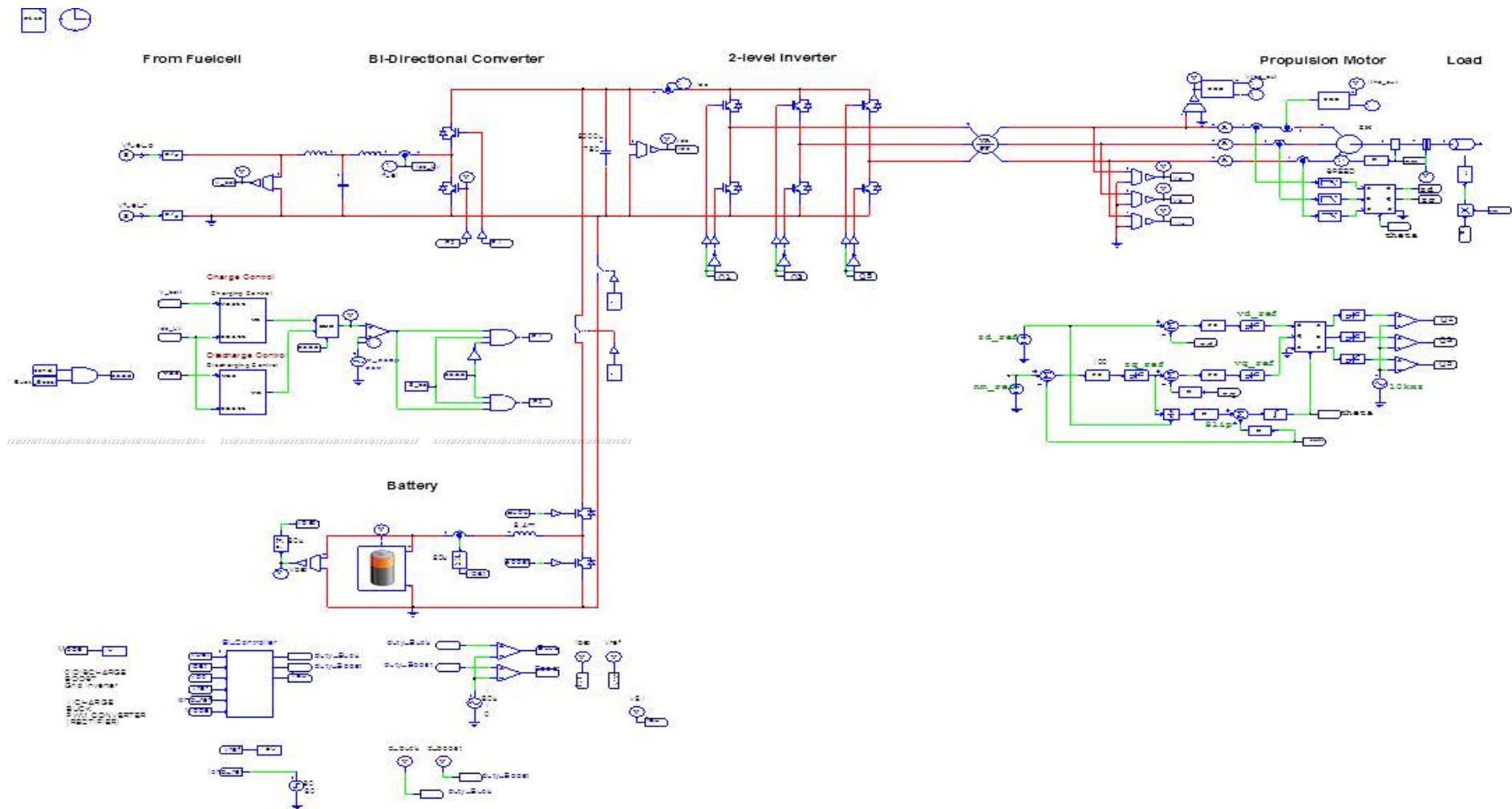
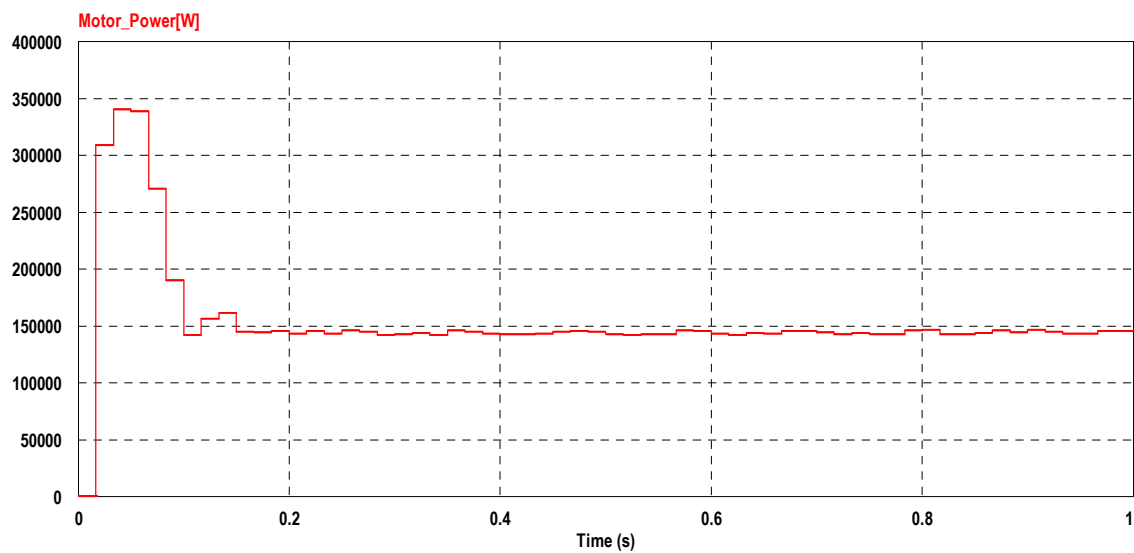


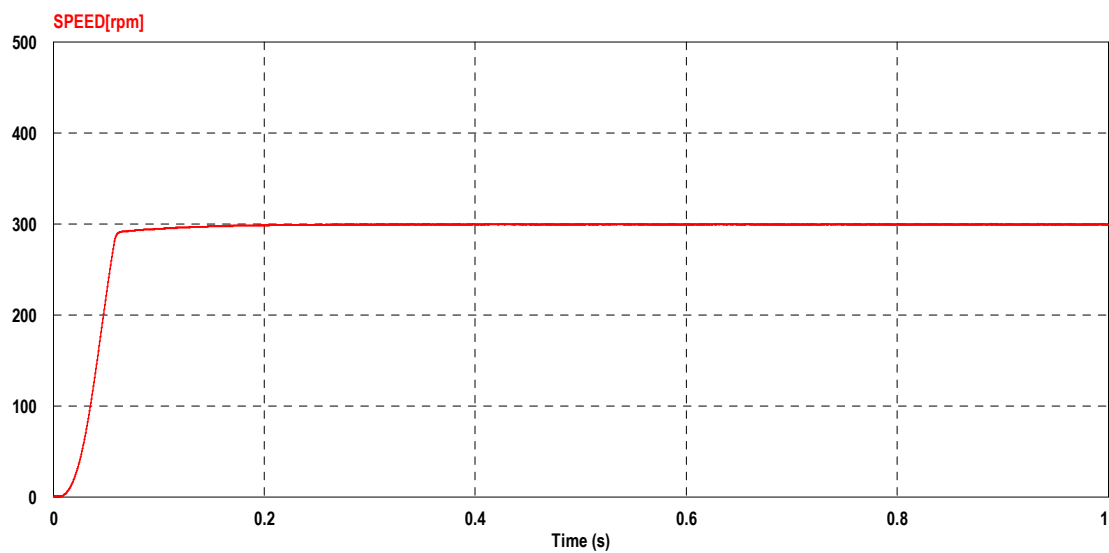
Fig. 4.3 Propulsion system Simulation circuit configuration

1) 부하 환경 1, 3, 5, 7구간 (Only Battery Mode)

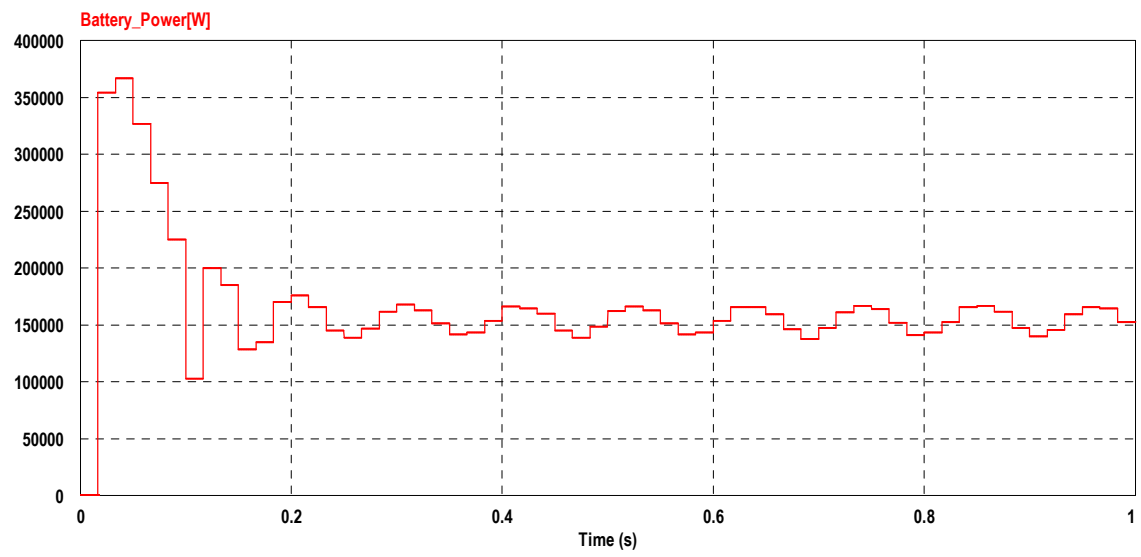
출항과 입항 및 협수로 운항 구간으로서 배터리만을 이용하여 속도 변화에 추종 하도록 설정하여 시뮬레이션 하였으며 Fig. 4.4와 같이 배터리 출력 150[kW] 에서 추진 전동기의 출력 150[kW], 회전속도 300[rpm]으로 구동됨을 확인하였다.



(a) Propulsion motor output power 150[kW]



(b) Propulsion motor rpm 300[rpm]

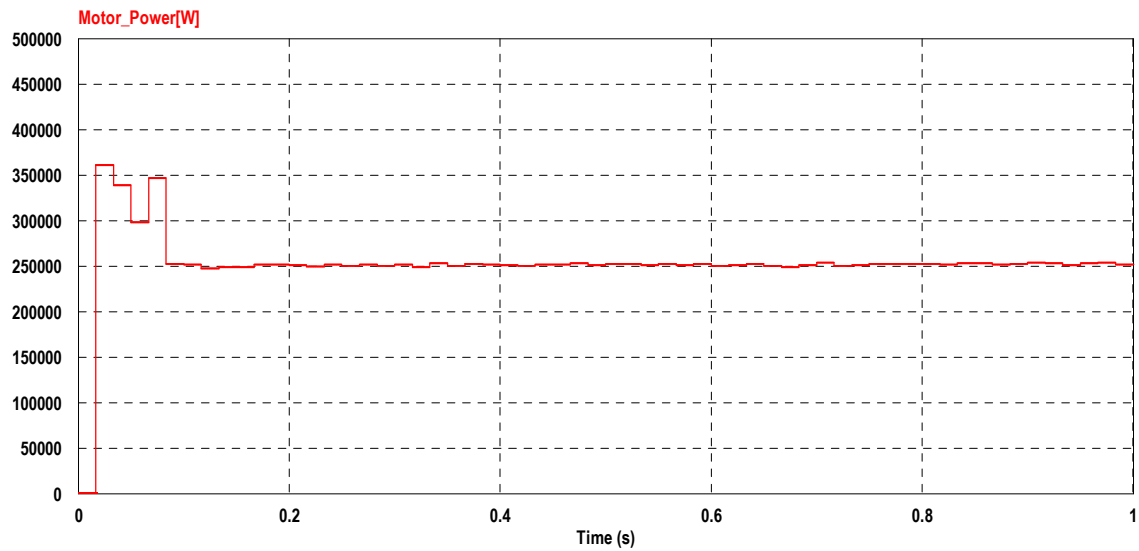


(c) Battery power 150[kW]

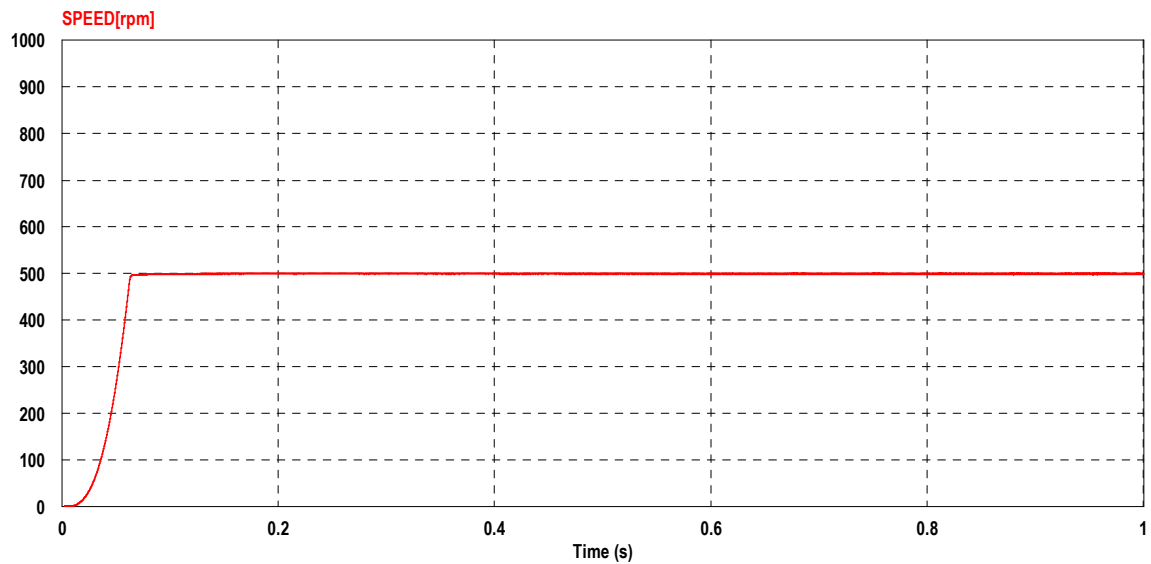
Fig. 4.4 Load profile section 1, 3, 5, 7 fuel cell hybrid system simulation result

## 2) 부하 환경 4, 8구간 (Only Battery Mode)

저속으로 단거리를 향해하는 구간으로서 배터리만을 사용하는 부하 환경에 대한 시뮬레이션으로서 Fig. 4.5와 같이 배터리 출력 250[kW]에서 추진 전동기의 출력 250[kW], 회전속도 500[rpm]으로 운전됨을 알 수 있었다.

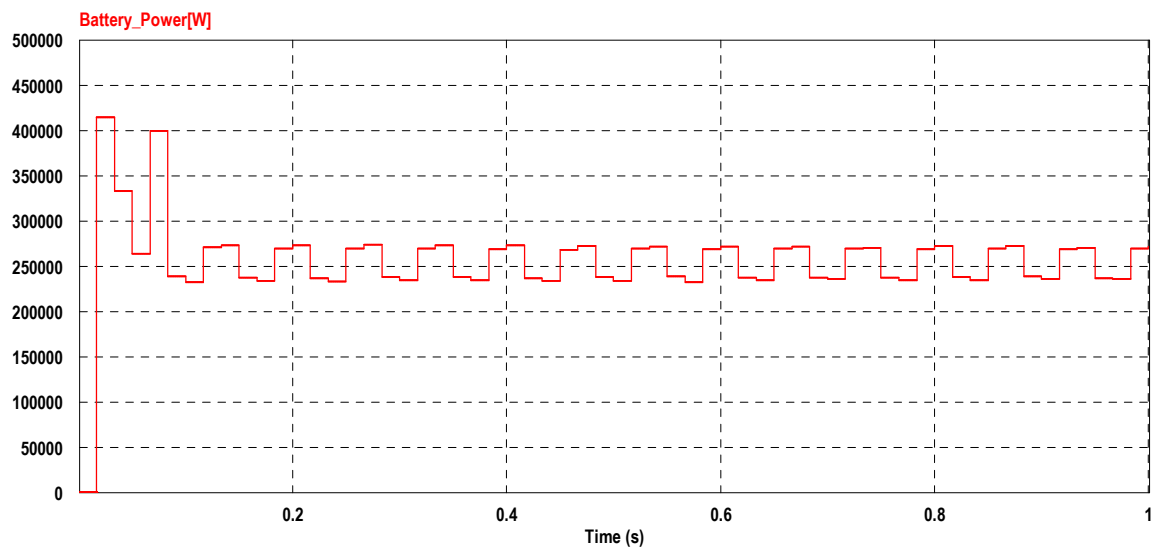


(a) Propulsion motor output power 250[kW]



(b) Propulsion motor rpm 500[rpm]



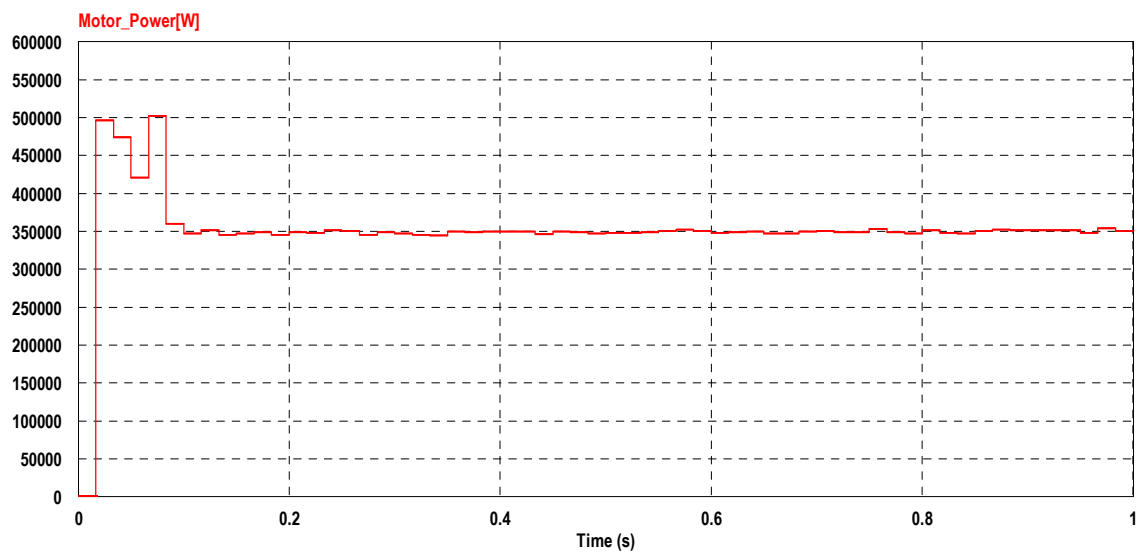


(c) Battery power 250[kW]

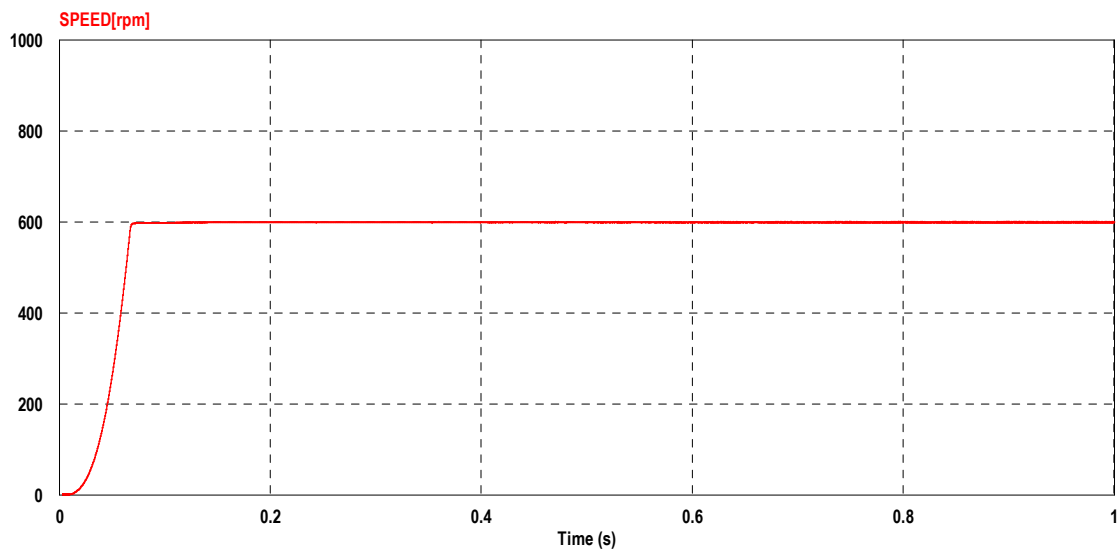
Fig. 4.5 Load profile section 4, 8 fuel cell hybrid system simulation result

### 3) 부하 환경 9구간 (Fuel Cell + Battery Mode)

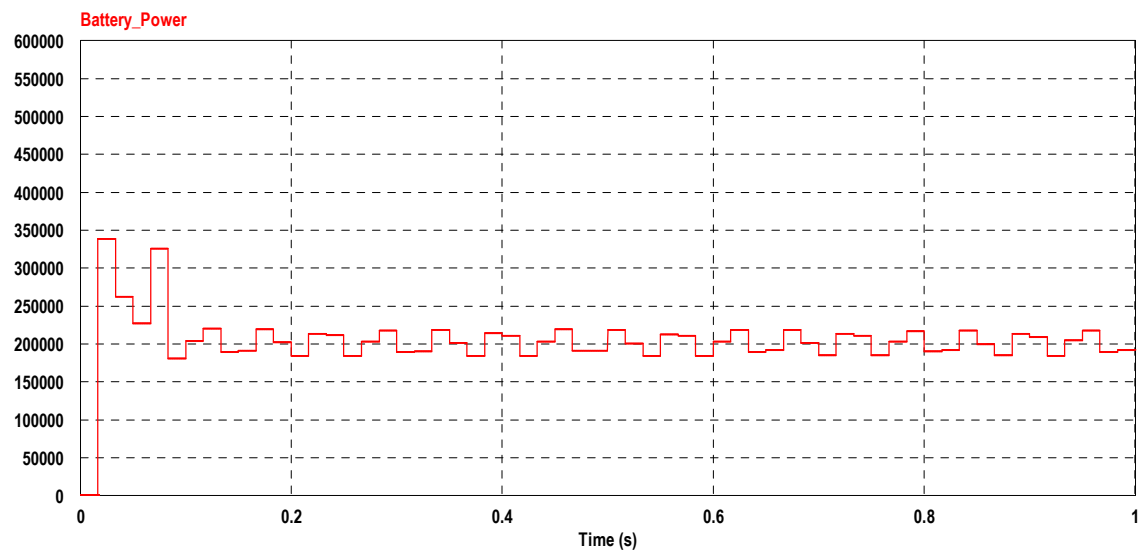
연료전지와 배터리를 하이브리드로 운용하는 구간으로서 350[kW]의 출력이 요구되며 시뮬레이션을 통하여 Fig. 4.6과 같이 연료전지 출력 150[kW], 배터리 출력 200[kW]에서 추진 전동기의 출력이 350[kW]이며 회전속도가 600[rpm]임을 확인하였다.



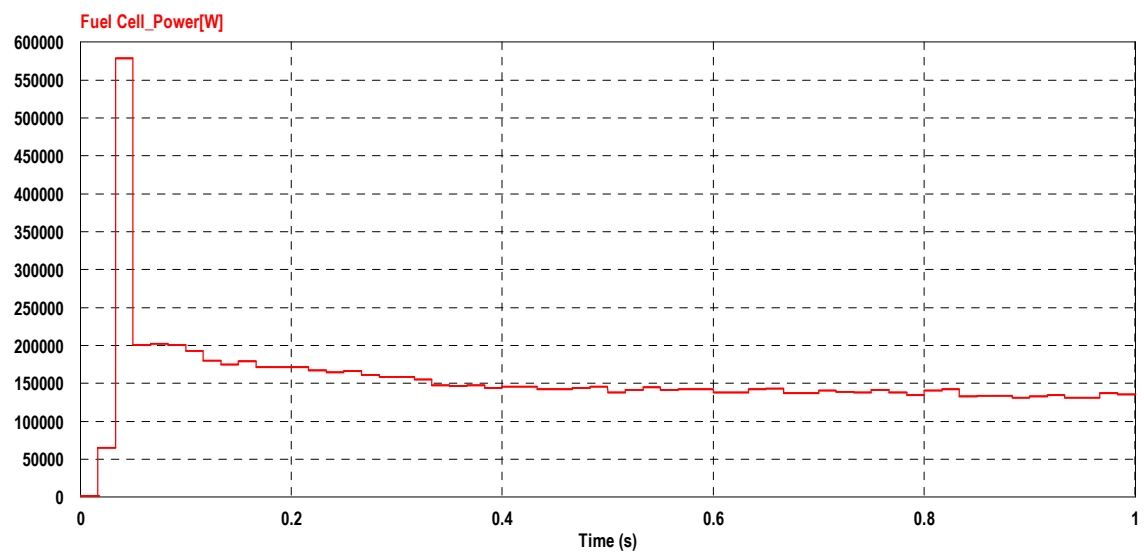
(a) Propulsion motor output power 350[kW]



(b) Propulsion motor rpm 600[rpm]



(c) Battery power 200[kW]

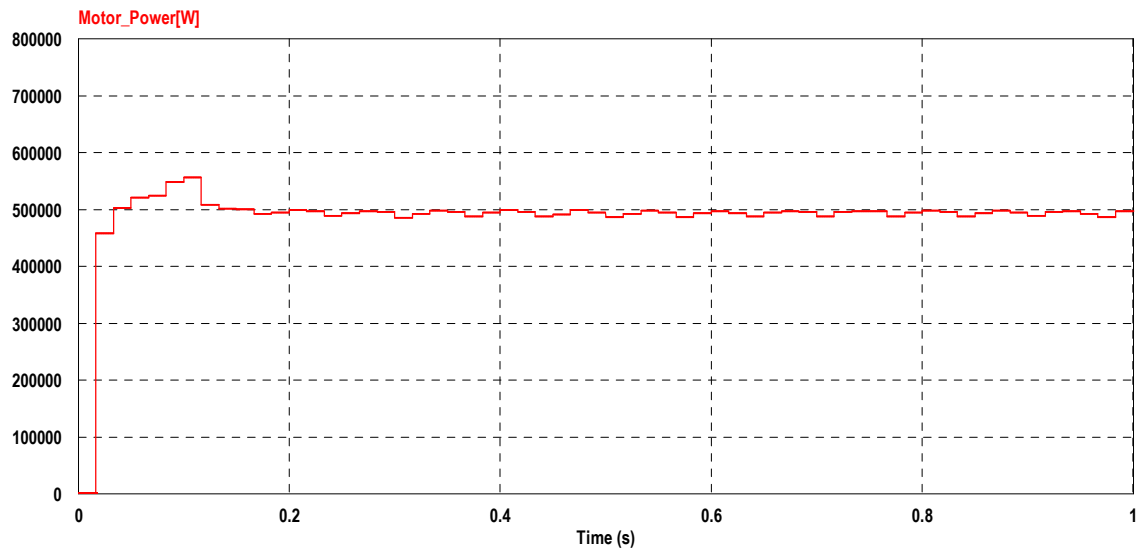


(d) Fuel Cell power 150[kW]

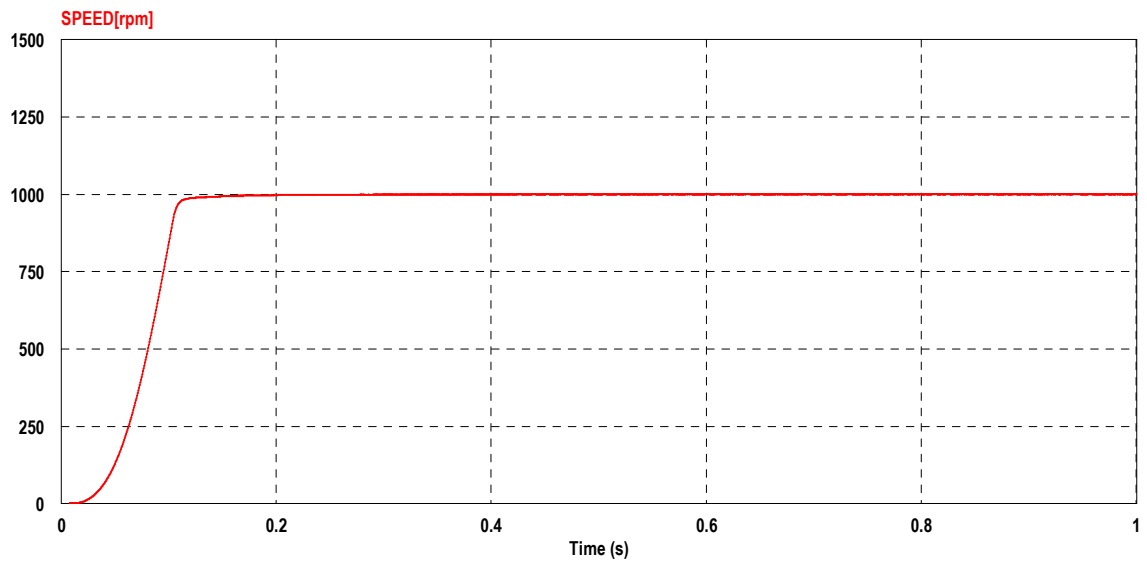
Fig. 4.6 Load profile section 9 fuel cell hybrid system simulation result

#### 4) 부하 환경 2, 6구간 (Fuel Cell + Battery Mode)

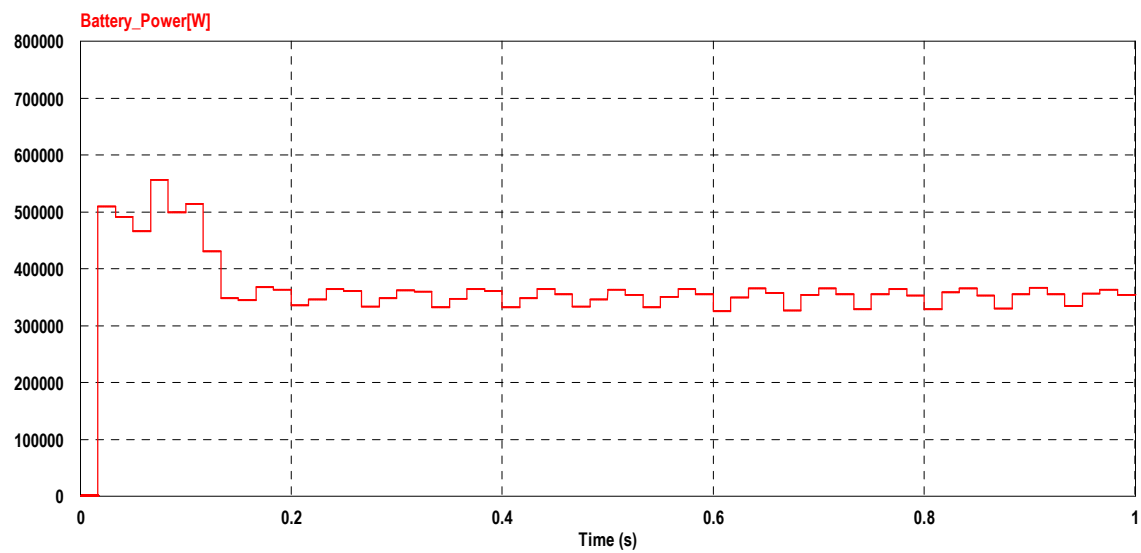
전속 향해 구간으로 연료전지와 배터리의 최대 출력 구간으로서 시뮬레이션을 통하여 Fig. 4.7과 같이 연료전지 출력 150[kW], 배터리 출력 350[kW]에서 추진 전동기의 출력 500[kW] 및 회전속도 1000[rpm]을 확인하였다.



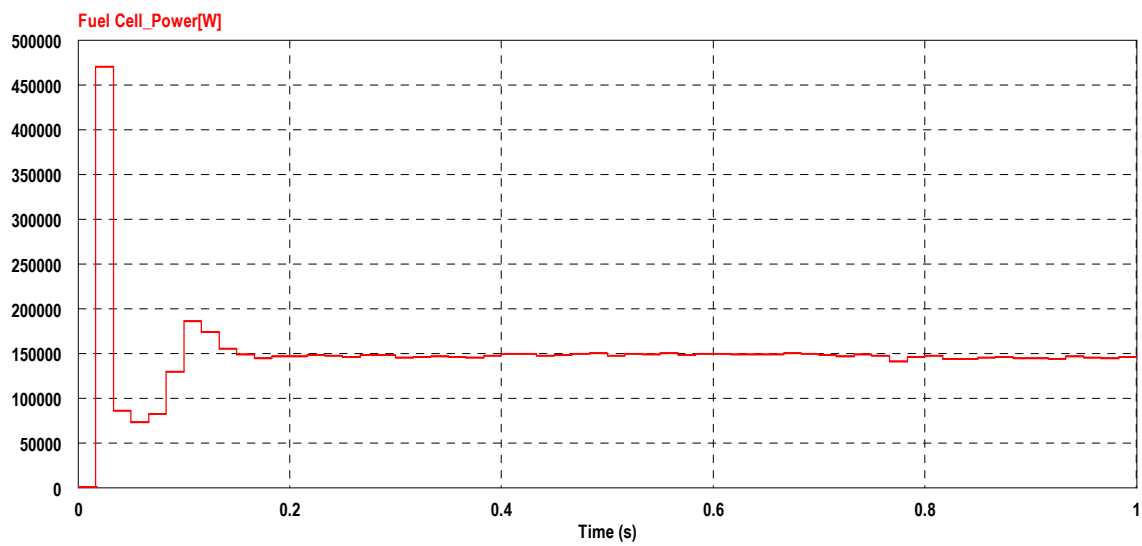
(a) Propulsion motor output power 500[kW]



(b) Propulsion motor rpm 1000[rpm]



(c) Battery power 350[kW]



(d) Fuel Cell power 150[kW]

Fig. 4.7 Load profile section 2, 6 fuel cell hybrid system simulation result

## 4.2 시뮬레이션 분석 결과

연료전지-배터리 하이브리드 추진시스템의 실 선박 적용성을 평가하기 위해 현재 운항중인 비교 대상의 디젤엔진 추진 선박의 실제 운전 부하 환경을 실측하여 9개 모드로 설정하였으며 연료전지 150[kW], 배터리 350[kW] 및 추진 전동기 500[kW]로 구성된 추진시스템에 운항 조건에 맞는 연료전지-배터리 하이브리드 모드로 시뮬레이션 하였다.

출항, 입항, 협수로 운항, 전속 운항, 장거리 운항, 단거리 운항 등의 복합 모드에 따라 시뮬레이션 한 결과에서 연료전지 출력, 배터리 출력 및 추진 전동기의 출력과 회전속도가 기존 디젤 선박의 부하 운항에 부합하도록 운전됨을 확인할 수 있었다.

## 제 5 장 디젤엔진 추진 선박의 배기가스 및 연료 소모량 측정

### 5.1 디젤엔진 추진 선박의 배기가스 측정

#### 5.1.1 배기가스 측정 장비

본 연구에서 선정한 대상 선박은 출력이 500[kW]인 엔진 2기가 장착된 여객선으로서 실제 부하 운전 환경에서 기관의 연료 소모량을 측정하기 위하여 테스트베드에 설치된 500[kW] 엔진 20[%], 40[%], 60[%], 80[%], 100[%] 부하를 인가하였다.

배기구의 샘플 장치로부터 측정된 가스를 가스 성분 분석기를 통해 분석하여 배기가스에 포함되어있는 이산화탄소와 질소산화물의 성분을 분석하여 운항 중 발생하는 배기가스 내의 이산화탄소와 질소산화물의 질량을 분석하였다.

Table 5.1은 배기가스 성분 분석을 위해 사용된 측정 장비의 제원이며 디젤 엔진, 동력계, 유량계 등 엔진의 기동과 연료유 소모량을 측정하는 장비와 가스 성분 분석기, Heat sample line, Heat sample pump, Sample prove 등의 배기가스내의 이산화탄소와 질소산화물 농도를 측정하는 장비의 제원과 모델명을 명시하였다.

Table 5.1 Equipment used for gas measurement

 <p>STX Engine - (MAN)  MODEL 5L23/30H ENG. NO. 5B5L23-7951  BORE x STROKE 223 x 300 mm  NO. OF CYL. 5 R.P.M. 720  MAX. CONTINUOUS OUTPUT 650 BHP  FIRING ORDER 1-2-4-5-3  WEIGHT 14591 kg DATE 2009.11  STX Engine Co., Ltd.  80, BEONGSANHONG, CP, JONGTONG-KU, SEOUL</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 4 stroke engine for marine <ul style="list-style-type: none"> <li>- Model : 5L23/30H</li> <li>- Maker : STX engine</li> <li>- Cylinder no. : 5</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Dynamometer <ul style="list-style-type: none"> <li>- Model : DT-3000</li> <li>- Maker : GO-POWER</li> <li>- TYPE : Water Brake</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Flow meter <ul style="list-style-type: none"> <li>- Model : Promass 80F</li> <li>- Maker : Endress+hauser</li> <li>- TYPE: Integrated mass flowmeter</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Gas analyzer <ul style="list-style-type: none"> <li>- Model : DX-4000</li> <li>- Maker : GASMET</li> <li>- Measuring method : FT-IR</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Heat Sample line <ul style="list-style-type: none"> <li>- Model : H340A-030-04-B3B2BL</li> <li>- Maker : GASMET</li> <li>- Spec. : Max. temp. 200°C</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Heated sample pump <ul style="list-style-type: none"> <li>- Model : Protable</li> <li>- Maker : GASMET</li> <li>- Spec. : 4 l /min, Opt. temp.180°C</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Sample probe <ul style="list-style-type: none"> <li>- Model : PSP400-H</li> <li>- Maker : GASMET</li> <li>- Spec : Max. temp. 600°C</li> </ul> </li> </ul>



### 5.1.2 배기가스 측정 방법

Fig 5.1은 디젤엔진 추진 선박의 엔진 가동 시 배기가스의 성분분석을 위한 샘플을 모으는 프로브와 샘플 라인으로 샘플링 펌프의 흡입력으로 배기가스가 샘플링 프로브와 샘플 라인을 통해 가스성분 분석기로 이송한다.

샘플링 펌프에 의해 이송된 배기가스는 Fig 5.2의 배기가스 성분 분석기로 성분을 분석하게 되며 배기가스의 측정 방식은 FT-IR 방식으로 적외선 광원이 간섭계를 통과하여 검출되는 파형을 수학적인 푸리에 변환 공식을 이용하여 가스의 성분과 농도를 검출하는 방식이다.

가스 분자는 적외선 광원에 조사되면 진동, 회전 등의 분자 운동이 형성되고, 이러한 변화는 분자의 성분에 따라 고유의 파장대에서 광원을 흡수하게 되어 이렇게 흡수된 광원을 검출한 스펙트럼은 분자의 성분을 구성하는 특징적인 흡수 스펙트럼을 만든다.



Fig 5.1 Exhaust gas sampling device



Fig 5.2 Exhaust gas component analyzer

FT-IR은 간섭계를 통과한 광원이 측정 셀에서 가스에 의해 흡수되고, 검출된 흡수 스펙트럼을 Fourier 변환하여 가스의 성분과 농도를 산출하며, 빠르고 아주 정확한 측정이 가능하다.

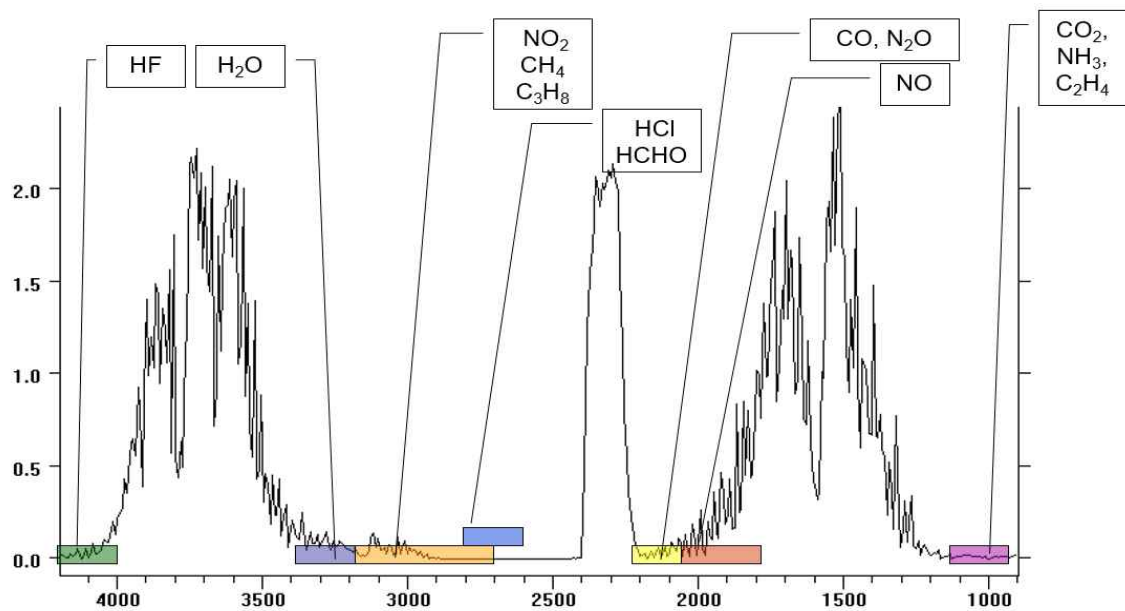


Fig 5.3 Exhaust gas analyzer area and representative spectrum

Fig 5.3은 배기가스 분석 영역과 대표적인 스펙트럼을 나타내며, 측정되는 배기가스는 이산화탄소 [vol-%] 값으로 나타내고 측정된 값을 [g/h]로 나타내기 위해서 엔진의 부하에 따른 배기가스 성분 농도 값을 식 (5.1)에 의해 계산하였다.

$$CO_2 \text{ 질량유량} [g/h] = 0.001517 \times CO_2 \text{ 농도} \times \text{배기가스 질량유량} \times 10000 \quad (5.1)$$

또한, 질소 산화물은 [ppm] 값으로 나타내며 측정된 값을 [g/h]로 나타내기 위해서 엔진의 부하에 따른 배기가스 성분 농도 값을 식 (5.2)에 의해 계산한다.

$$NO_x \text{ 질량유량} [g/h] = 0.001586 \times NO_x \text{ 농도} \times \text{배기가스 질량유량} \times \text{습도, 실온, 흡기온도에 관한 보정계수} \quad (5.2)$$

### 5.1.3 디젤엔진 추진 선박의 배기가스 측정결과

#### 1) 부하 운전환경 1, 3, 5, 7구간 배기가스 측정결과

배기가스 측정값은 회당 10초간, 50회 측정하여 평균값을 계산하였다. Fig 5.4에서와 같이 이산화탄소 평균값은 3.31[vol-%]이며, 질소산화물 평균값은 401.18[ppm]이다. 식 (5.1) 및 식 (5.2)에 측정값을 대입하여 계산하여 산출한 질량 유량값은 이산화탄소 78,235.00[g/h], 질소산화물 1,069.60[g/h] 이다.

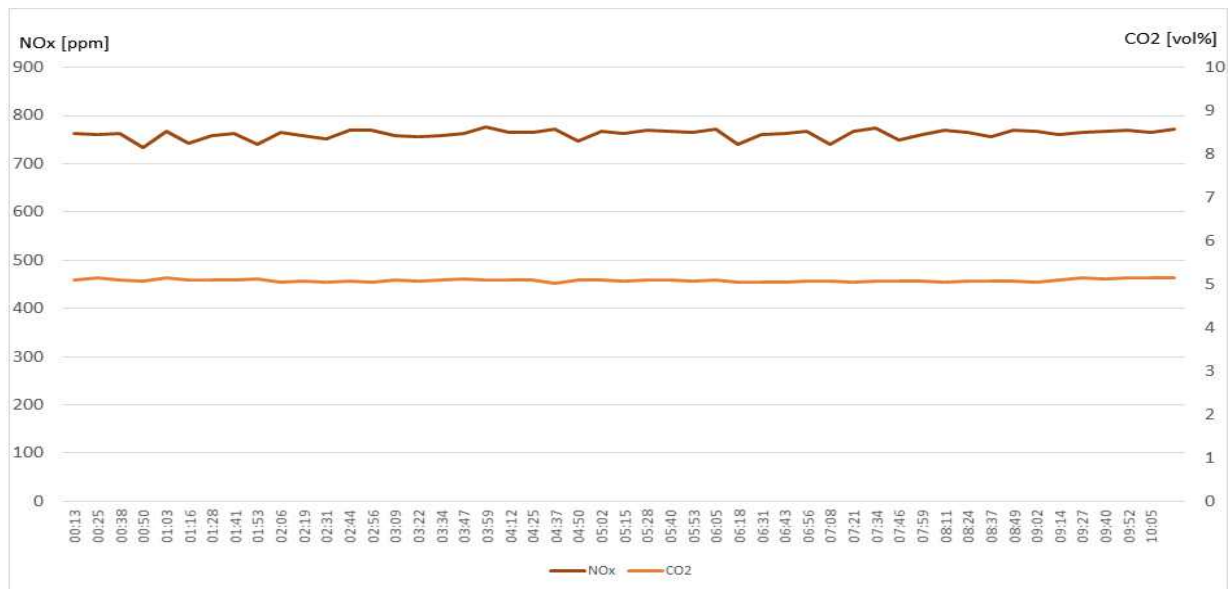


Fig. 5.4 Load profile section 1, 3, 5, 7 emission gas measurement data

## 2) 부하운전 환경 4, 8구간 배기가스 측정결과

가스 측정값은 회당 10초간, 50회 측정하여 평균값을 계산하였으며 Fig 5.5에  
서와 같이 이산화탄소 평균값은 5.09[vol-%]이며, 질소산화물 평균값은 761.73  
[ppm] 이며 식 (5.1) 및 식 (5.2)에 측정값을 대입하여 계산한 질량 유량은 이산  
화탄소 130,584.00[g/h], 질소산화물 2,195.50[g/h] 이다.

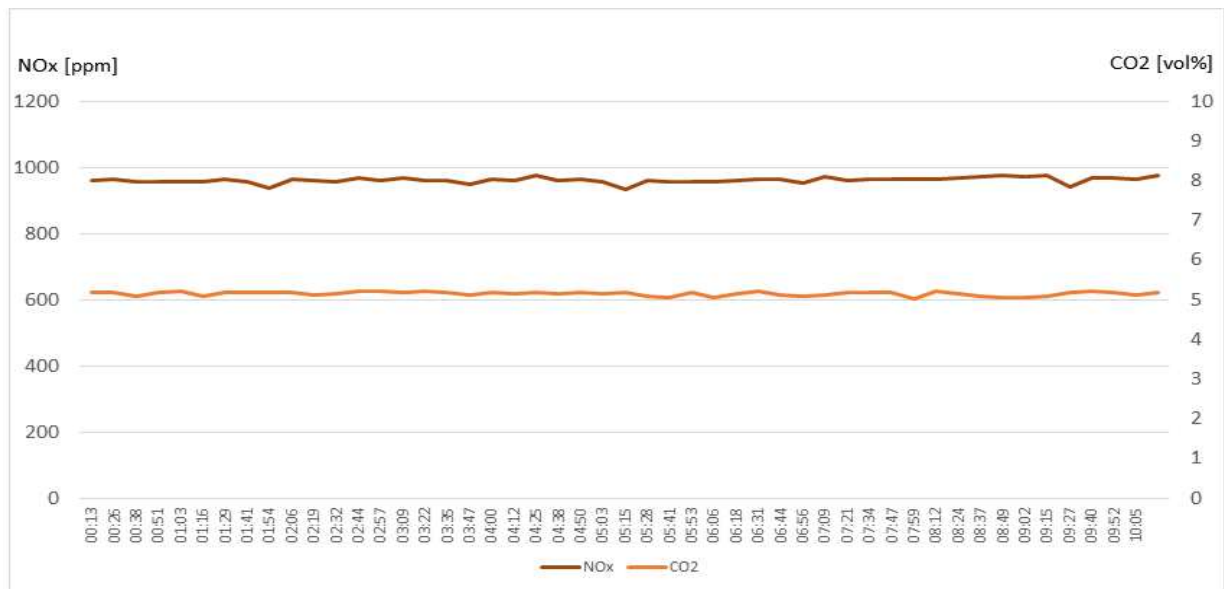


Fig. 5.5 Load profile section 4, 8 emission gas measurement data

### 3) 부하운전 환경 9구간 배기가스 측정결과

배기가스 측정값은 회당 10초간, 50회 측정하여 평균값을 계산하였으며 Fig 5.6에서와 같이 이산화탄소 평균값은 5.15[vol-%] 질소산화물 평균값은 961.38 [ppm]이었으며 질량 유량으로 산출하면 이산화탄소 180,981.00[g/h], 질소산화물 3,585.50[g/h] 이다.

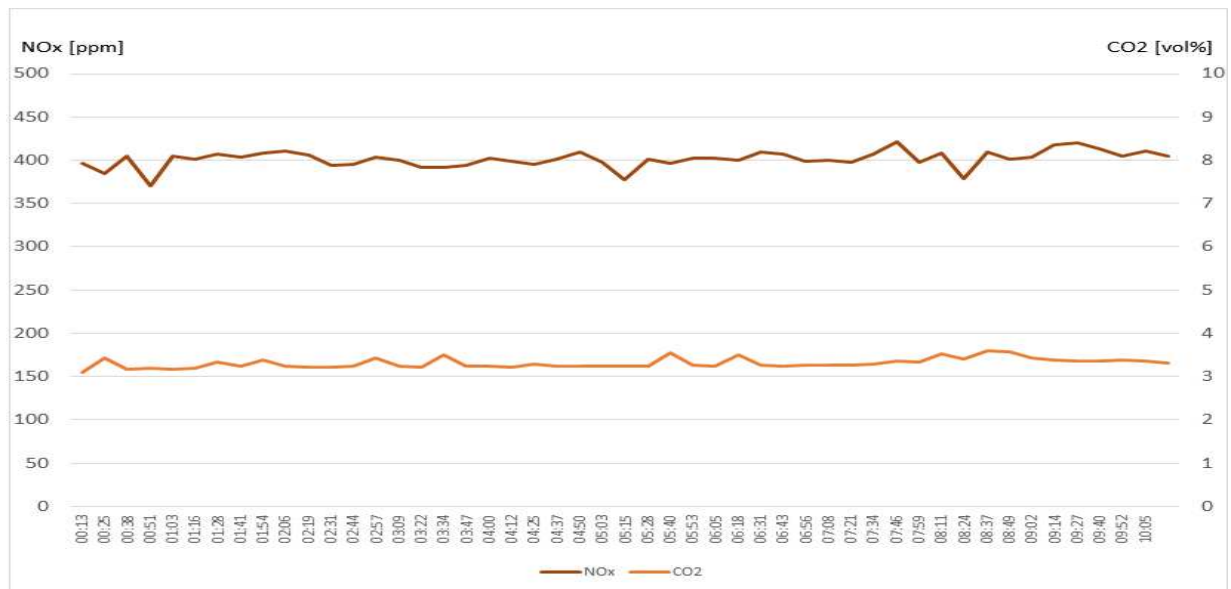


Fig. 5.6 Load profile section 9 emission gas measurement data

#### 4) 부하운전 환경 2, 6구간 배기가스 측정결과

배기가스 측정값은 회당 10초간, 50회 측정하여 평균값을 계산하였으며 Fig 5.7에서와 같이 이산화탄소 평균값은 5.17[vol-%] 질소산화물 평균값은 1049.66 [ppm]이며 질량 유량값으로 환산하면 이산화탄소 289,408.00[g/h], 질소산화물 6,571.00[g/h] 이다.

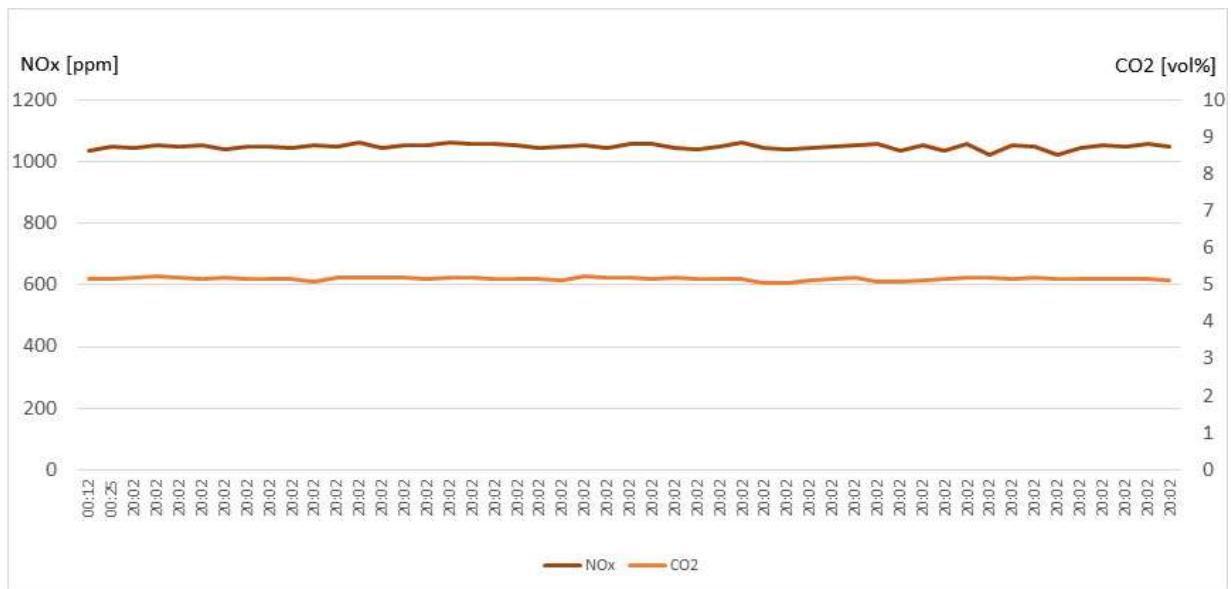


Fig. 5.7 Load profile section 2, 6 emission gas measurement data

#### 5.1.4 디젤엔진 추진 선박의 부하운전 환경에 따른 배기가스 측정 결과 분석

“한솔 2호”는 통영 - 비진 내항 - 비진 외항 - 당금 - 대항 - 소매물도의 경로로 운항하고 주말 기준 하루 3항차를 운항하며 주간 2항차 운항하므로 주말 기준 하루 3항차를 기준으로 배기가스 배출량을 산정하였다. Table 5.2에서는 디젤엔진 추진 선박과 연료전지-배터리 하이브리드 선박에서 배출되는 질소산화물 및 이산화탄소 발생량에 대해 비교분석 하였다.

디젤엔진을 연료전지-배터리 하이브리드 시스템으로 대체하였을 경우 이산화탄소 발생은 일일 발생 기준 1,737.60[kg] 저감 되고 질소산화물은 일일 발생 기준 66.32[kg] 저감 됨을 확인할 수 있다.

**Table 5.2** Comparison of exhaust emission

Load profile	CO <sub>2</sub> [kg]		NO <sub>x</sub> [kg]	
	Diesel	Fuel cell-battery hybrid	Diesel	Fuel cell-battery hybrid
1	1.30	×	0.02	×
2	172.80	×	7.50	×
3	1.30	×	0.02	×
4	22.40	×	0.37	×
5	1.30	×	0.02	×
6	172.80	×	7.50	×
7	1.30	×	0.02	×
8	22.40	×	0.37	×
9	38.80	×	0.76	×
One way	434.40	×	16.58	×
Round way	868.80	×	33.16	×
1 day (2 round way)	1737.60	×	66.32	×



## 5.2 디젤엔진 추진 선박의 연료 소모량

### 5.2.1 연료 소모량 측정 장비

연료 소모량 측정을 위해 엔진의 연료유 공급 및 회수부에 Fig. 5.8의 유량계를 설치하여 계측하였고 유량계는 적산 질량 유량계 타입을 사용하였다.



Fig. 5.8 Measuring fuel consumption by flow meter

### 5.2.2 연료 소모량 측정 방법

연료 소모량은 한 구간에서 5회씩 측정하였으며, 5회 측정값에 대한 평균값을 실제 연료 소모량으로 정리하였고 부하운전 환경에 따른 공급되는 연료유와 회수되는 연료유의 양의 차를 [kg/h]로 구하여 부하운전 환경 운전 시간으로 환산하여 연료유 사용량을 구했다.

### 5.2.3 디젤엔진 추진 선박의 연료 소모량

한솔 2호는 통영 - 비진 내항 - 비진 외항 - 당금 - 대항 - 소매물도의 경로로 운항하고 주말 기준 하루 3항차를 운항하며 주간 2항차 운항하므로 Table 5.3과 같이 주말 기준 하루 3항차를 기준으로 연료 소모량을 산출하였다.

**Table 5.3** Diesel oil consumption

Load profile	Fuel consumption [kg]
	Diesel propulsion
1	1.20
2	69.10
3	1.20
4	8.80
5	1.20
6	69.10
7	1.20
8	8.80
9	18.00
One way	178.60
Round way	357.20
1 day (2 round way)	714.40

## 제 6 장 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 선박과 디젤엔진 추진선박의 배기가스 배출량 및 연료 소모량 비교

### 6.1 연료전지-배터리 하이브리드 선박 수소 소모량

수소의 질량 당 에너지 밀도는 142[kJ/g]로, 휘발유의 4배, 천연가스의 3배 수준이다. 경유와 휘발유의 연료 효율비가 4:3이므로 대상 선박과 동일한 경로로 운항하는 경우에 필요한 수소 양은 식 (6.1)과 같다.

$$\text{수소 소모량}[kg] = \text{경유 소모량}[kg] \times \frac{1}{4} \times \frac{3}{4} \quad (6.1)$$

식 (6.1)에 따라 연료전지-배터리 하이브리드 선박의 부하운전 환경에 따른 수소 소모량을 계산하면 Table 6.1과 같이 구할 수 있다.

Table 6.1 Comparison of fuel consumption

Load profile	Fuel consumption [kg]	
	Diesel propulsion	Fuel cell-Battery hybrid
	Diesel oil / Fuel Price	H <sub>2</sub> / Fuel Price
1	1.20	0.23
2	69.10	12.96
3	1.20	0.23
4	8.80	1.65
5	1.20	0.23
6	69.10	12.96
7	1.20	0.23
8	8.80	1.65
9	18.00	3.38
One way	178.60 / 204,300[원]	33.49 / 209,925[원]
Round way	357.20 / 408,601[원]	66.98 / 419,850[원]
1 day (2 round way)	714.40 / 817,202[원]	133.95 / 839,700[원]

대상 선박이 경우 하루에 2회 운항하므로 714.40[kg]/1일의 사용량을 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있으며 하루 운항에 필요한 연료비는 기존의 경유를 기준으로 하는 경우 817,202[원]이다. 또한, 수소연료의 가격은 현재 [kg]당 6,000원~8,000원 선이며, 대상 선박과 동일한 경로로 운항하는 경우 필요한 수소의 양은 133.95[kg]이므로 수소 가격을 6,000[원/kg]로 산정하면 하루 운항에 필요한 연료비는 839,700[원]으로 기존의 경유를 사용하는 선박과 비교하면 가격 경쟁력이 있다고 볼 수 있다.

하지만 현재의 수소 가격은 원유 정제 과정에서 발생하는 부산물로 생산되는 수소의 가격이며 이를 연료로 사용하기 위해 수소를 따로 정제할 경우의 수소 가격은 50,000[원/kg]으로 예상되어 현재 가격의 약 8배에 달하여 경유 사용 대비 경쟁력을 얻기 어려운 게 현실이다.

## 6.2 디젤엔진 추진 선박과 연료전지-배터리 하이브리드 선박의 연료 소모량 비교분석

연료전지-배터리 하이브리드 추진시스템의 시뮬레이션 결과에서 비교 대상 선박의 운전환경에서 연료전지 150[kW], 배터리 350[kW] 추진 전동기 500[kW]를 이용하여 기존의 디젤 기관과 동일한 운항 조건에서 추진 전동기의 출력과 회전속도가 목표치에 안정되는 구간을 확인하여 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 기존 선박의 운항 패턴에 적용 가능성을 확인하였다.

## 제 7 장 결 론

본 논문에서는 연료전지와 배터리를 이용하여 추진하는 하이브리드 전기 추진 선박을 모델링 하였으며, 기존 대상 선박의 운항환경을 바탕으로 추진시스템 이외의 선박 제원은 동일하다는 가정하에서 디젤 기관 추진시스템을 연료전지와 연료전지-배터리 하이브리드 시스템으로 대체하였을 경우 얻을 수 있는 환경적 영향과 경제적 측면에 대한 실증 연구를 진행하였고, 결과는 다음과 같다.

[1] 환경적 측면의 장점으로선 국제해사기구의 해양환경보호위원회에서 규제하는 이산화탄소 저감을 위한 화석연료유 사용제한 측면에서 현재의 디젤엔진을 연료전지-배터리 하이브리드 시스템으로 대체하였을 경우 이산화탄소는 일일 발생 기준 1,737.60[kg] 저감 및 질소산화물은 일일 발생 기준 66.32[kg] 저감되는 것을 확인하였다.

[2] 경제적 측면으로 비교해 보면 1항차 기준, 연료유 소모량은 357.20[kg]을 줄일 수 있으며, 대상 선박의 경우 하루 2회 운항하므로 하루에 714.40[kg]의 경유를 줄일 수 있는 것으로 확인할 수 있었다. 하루 운항에 필요한 연료비는 경유 기준 817,202[원]이며, 수소연료의 가격이 [kg]당 6,000 ~ 8,000[원] 선에서 형성된다면 경유 대비 경제성을 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 현재 수소 공급가의 8배에 달하는 정제 수소의 가격으로는 기존의 경유 대비 경제성을 확보하기 어려운 측면이 있으므로 환경적 측면을 고려한다면 정부 보조금을 정책적으로 지원하는 방법 및 수소공급 인프라를 확대하여 공급 가격을 현재의 경유와 경쟁할 수 있는 정도의 금액으로 낮출 필요가 있다.

[3] 연료전지-배터리 하이브리드 추진시스템의 시뮬레이션 결과에서 비교 대상 선박의 운전환경에서 연료전지 150[kW], 배터리 350[kW], 추진 전동기 500[kW]를 이용하여 기존의 디젤 기관과 동일한 환경의 운항이 가능함을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] 노길태, 2015. *선박용 연료전지 기술개발 현황*. 충남미래연구포럼 6차. KR
- [2] James Larminie, Andrew Dicks, 2008. *Fuel Cell Systems Explained* JOHN WILEY & SONS,LTD Appendix 2 pp. 496~501
- [3] 전현민, 2018. *AFC 정류기의 성능개선에 관한 연구*. 한국해양대학교
- [4] 김종수, 전현민, 김덕기, 2017. *선박 운전환경에 따른 하이브리드 전기추진선박의 운전모드별 출력 특성에 관한 연구*. 한국마린엔지니어링학회. Vol.41. No.3. pp. 245~250
- [5] 장인용, 구영모, 김준범, 김한상, 남석우, 양태현, 전희권, 조은애, 황상문, 2018. *연료전지 기술의 연구개발과 산업 동향*. GTC 녹색기술센터, pp. 4~7
- [6] 박정태, 이갑재, 장성영, 이광주, 김종규, 조성준. 2000. *선박용 전기추진시스템의 기술개발 동향*, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 958-960
- [7] (주)케이에프, 2015. *국내 연근해 선박에 의한 대기오염물질 및 온실가스 배출계수 개발과 산출량 산정(II) 최종보고서*, 국립환경과학원
- [8] 수소융합얼라이언스추진단 (H2KOREA) , 2017. *수송용 수소연료의 가격 설정 및 수급체계 구축 방안*, 수소융합얼라이언스추진단(H2KOREA)

[9] Ameen M. Bassam, Alexander B. Phillips, Stephen R. Turnock, Philip A. Wilson , 2016. *An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel*, ScienceDirect

[10] L. van Biert, M. Godjevac, K. Visser, P.V. Aravind, 2016. *A review of fuel cell systems for maritime applications*, Journal of Power

[11] Tomas Tronstad, Hanne Hogmoen Astrand, Gerd Petra Haugom, Lars Langfeldt, 2017. *A STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS IN SHIPPING* , EMSA European Maritime Safety Agency